



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Faculdade de Ciências e Tecnologia

DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR ATRAVÉS DA ENERGIA SOLAR

CASO DE ESTUDO: SALAMANSA – CABO VERDE

Carolina Eneida Monteiro da Cruz

*Dissertação apresentada à Universidade do Algarve, Faculdade de
Ciências e Tecnologia, para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente*

Orientadores: Professor Doutor António Mortal
Professor Armando Inverno

Faro, 2012

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Faculdade de Ciências e Tecnologia

**DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR ATRAVÉS DA
ENERGIA SOLAR**

CASO DE ESTUDO: SALAMANSA – CABO VERDE

Carolina Eneida Monteiro da Cruz

*Dissertação apresentada à Universidade do Algarve, Faculdade de
Ciências e Tecnologia, para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente*

Orientadores: Professor Doutor António Mortal
Professor Armando Inverno

Faro, 2012

FICHA TÉCNICA

Título: Dessalinização da água do mar através de energia solar – Caso de estudo: Salamansa-Cabo Verde.

Autor: Carolina Eneida Monteiro da Cruz

Objectivo do presente trabalho: Dissertação apresentada à Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente.

Orientação científica do trabalho: Professor Dr. António Mortal e Professor Armando Inverno.

Contactos do autor: carolinacruzcv@hotmail.com

Local: Faro

Ano: 2012

Declaro ser a autora deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

(Carolina Eneida Monteiro da Cruz)

“Copyright” – Carolina Eneida Monteiro da Cruz, UAlg, FCT

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicatória:

Ao meu adorado Deus e à minha admirável família.

Agradecimentos

Primeiramente à Deus pela saúde e pela força de enfrentar mais um desafio.

Aos meus pais, por serem o meu braço direito em tudo pois, sem o seu apoio, motivação e amor nunca teria chegado até aqui. Também aos meus irmãos (Karyn, João e Luís) e namorado por, de uma forma ou de outra, estarem presentes num momento tão importante na minha vida, pela ajuda incondicional e carinho.

Aos meus orientadores, pelo apoio constante, pela paciência, pelo tempo que generosamente me dedicaram e pelos ensinamentos prestados durante a realização desta dissertação sem os quais não seria possível a existência deste trabalho.

Na fase inicial do trabalho foi difícil encontrar dados específicos e actuais do local em estudo no entanto, graças à algumas empresas envolvidas foi possível superar essa dificuldade. Desta forma, agradeço a todas as pessoas, representantes dessas empresas, pela especial contribuição neste trabalho:

- ELECTRA: aos engenheiros José Neves, Carlos Melício, Aníbal Medina, Pedro Cruz, Júlio César e à bióloga Irondina Évora.
- INMG: à engenheira Pavlina Cardoso e a Presidente do Conselho de Administração do INMG, Ester Brito.
- INECV: ao Sr. José Carlos
- INDP: à socióloga Iolanda Cruz.

Ao professor Rui Paisana, e à todos que conviveram comigo, cedendo parte do seu tempo para ouvir os meus desabafos nas horas de ansiedade, e à todos que utilizarão essa dissertação para fins académicos ou profissionais.

Índice

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Enquadramento..... | 1 |
| 1.2. Objectivo e estrutura da tese | 3 |
| 2. CABO VERDE – CARACTERIZAÇÃO | 5 |
| 2.1. Geografia..... | 5 |
| 2.2. Geologia | 6 |
| 2.3. Clima | 7 |
| 2.4. Contexto socioeconómico | 8 |
| 2.5. Principais problemas ambientais em cabo verde..... | 12 |
| 2.6. A situação dos recursos hídricos em cabo verde – a problemática da escassez de água.. | 16 |
| 2.6.1. Recursos disponíveis | 17 |
| 2.6.2. Mobilização e exploração dos recursos..... | 18 |
| 2.6.3. Água potável | 20 |
| 2.6.4. Qualidade | 21 |
| 2.6.5. A relação entre a água e os sectores de actividades | 23 |
| 2.6.6. Produtores e distribuidores de água | 24 |
| 2.8. Recursos renováveis em cabo verde..... | 27 |
| 3. ESTADO DA ARTE..... | 28 |
| 3.1. Dessalinização da água do mar | 28 |
| 3.2. Métodos de dessalinização da água..... | 29 |
| 3.2.1. Processos de dessalinização térmica | 30 |
| 3.2.1.1. <i>Destilação por energia solar</i> | 31 |
| 3.2.1.2. <i>Destilação multi-estágios</i> | 31 |
| 3.2.1.3. <i>Destilação multi-efeito</i> | 33 |
| 3.2.1.4. <i>Destilação por compressão de vapor</i> | 34 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.2.1.5. | <i>Dessalinização por congelação em vácuo</i> | 36 |
| 3.2.1.6. | <i>Dessalinização por congelação através de refrigerante secundário</i> | 37 |
| 3.2.1.7. | <i>Dessalinização por formação de hidratos de gás ou clatratos</i> | 37 |
| 3.2.2. | Processos de dessalinização por membranas..... | 38 |
| 3.2.2.1. | <i>Dessalinização por electrodialise</i> | 38 |
| 3.2.2.2. | <i>Osmose Inversa ou Reversa</i> | 39 |
| 3.2.3. | Sistemas de Dessalinização Híbridos | 40 |
| 3.2.4. | Comparação dos processos de dessalinização | 41 |
| 3.3. | Possíveis impactes ambientais | 43 |
| 3.4. | Custos associados à dessalinização da água do mar..... | 45 |
| 4. | METODOLOGIA | 47 |
| 4.1. | Caracterização da área de estudo | 48 |
| 4.1.1. | Localização geográfica..... | 48 |
| 4.1.2. | Caracterização física | 50 |
| 4.1.3. | Caracterização Socioeconómica..... | 53 |
| 4.1.4. | Produção e abastecimento de água..... | 54 |
| 4.2. | Seleção do processo tecnológico | 57 |
| 4.2.1. | Destilação solar – a tecnologia de dessalinização proposta | 57 |
| 4.2.1.1. | <i>Composição.....</i> | 60 |
| 4.2.1.2. | <i>Classificação dos destiladores solares.....</i> | 66 |
| 4.2.1.3. | <i>Vantagens e desvantagens dos destiladores solares</i> | 66 |
| 4.3. | O sistema de dessalinização proposto | 69 |
| 4.3.1. | A escolha do material | 71 |
| 4.4. | Modelação matemática..... | 72 |
| 4.4.1. | Modelo ambiental..... | 73 |
| 4.4.1.1. | <i>Radiação Solar.....</i> | 75 |
| 4.4.1.2. | <i>Tempo solar e geometria solar.....</i> | 75 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 4.4.1.3. | <i>Radiação Solar no plano inclinado</i> | 78 |
| 4.4.2. | Modelo de destilação passiva | 79 |
| 4.4.2.1. | <i>Cobertura</i> | 81 |
| 4.4.2.2. | <i>Massa de água</i> | 82 |
| 5. | APRESENTAÇÃO/ ANÁLISE DOS RESULTADOS | 83 |
| 5.1. | Modelo ambiental..... | 83 |
| 5.2. | Destilação solar passiva | 87 |
| 6. | CONCLUSÕES..... | 93 |
| 7. | SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO | 96 |
| 8. | REFERÊNCIAS | 99 |
| 9. | ANEXOS..... | 108 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Mapa de escassez de água no Mundo [51]..... | 2 |
| Figura 2.1 - Localização geográfica de Cabo Verde [www.caboverde.com]..... | 5 |
| Figura 2.2 - Divisão do arquipélago de Cabo Verde [23]..... | 6 |
| Figura 2.3 - Potencial de energia solar em Cabo Verde [22]..... | 27 |
| Figura 3.1 - Esquema geral do princípio da dessalinização da água [9]..... | 29 |
| Figura 3.2 - Ilustração de um sistema de destilação solar [9]..... | 31 |
| Figura 3.3 - Diagrama simplificado da destilação multi-estágios [9]..... | 32 |
| Figura 3.4 - Diagrama simplificada da destilação por múltiplo efeito [9]..... | 34 |
| Figura 3.5 - Diagrama de destilação por compressão de vapor [9]..... | 36 |
| Figura 3.6 - Ilustração de um dessalinizador por congelação a vácuo [9]..... | 36 |
| Figura 3.7 - Princípio da electrodialise [9]..... | 39 |
| Figura 3.8 - Ilustração da osmose inversa [9]..... | 40 |
| Figura 4.1 - Localização do local de estudo - Vila de Salamansa [25]; Ilha de São Vicente [26]..... | 49 |
| Figura 4.2 - Chafariz de água doce e chafariz de água salobra..... | 55 |
| Figura 4.3 - a) Double slope b) Single slope [55]..... | 63 |
| Figura 4.4 - Configuração do destilador proposto em cima; tanque de água a destilar em baixo..... | 69 |
| Figura 4.5 - Dimensões da estrutura do destilador proposto..... | 70 |
| Figura 4.6 - Mecanismos de transferência de energia num destilador solar passivo [53]..... | 80 |
| Figura 7.1: Configuração de um possível destilador solar (vista de frente) em cima; tanque de água a destilar (vista de cima) em baixo..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura I.1: Localização do destilador proposto no local de estudo. Carta de São Vicente facultado pela Electra de São Vicente..... | 108 |
|--|-----|

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Precipitação média para as ilhas do arquipélago de Cabo Verde [51]..... | 8 |
| Tabela 2.2 - Evolução da população residente em Cabo Verde por Ilha (1900-2010) [12]..... | 9 |
| Tabela 2.3 - Disponibilidade total de águas subterrâneas e superficiais, em milhões de m ³ /ano [49]..... | 17 |
| Tabela 2.4 - Pontos de água explorados em Cabo Verde [49]..... | 19 |
| Tabela 2.5 - Agregados segundo a Principal Fonte de Abastecimento de Água por concelho – Censo 2010 [13]..... | 20 |
| Tabela 2.6 - Tarifário da água com incidência do IVA, de acordo com a ARE [49].... | 25 |
| Tabela 4.1 - Velocidade do vento (média mensal e anual em km/h) da Zona de Salamansa – 1996-2011 [50]..... | 50 |
| Tabela 4.2 - Precipitação total (mm) em Salamansa– Mensal e anual 1996-2011 [50]..... | 51 |
| Tabela 4.3 - Insolação total (em horas) em Salamansa de 1996-2011 [50]..... | 52 |
| Tabela 4.4 - Temperatura do ar (°C) em Salamansa – Média mensal e anual 1996-2011 [50]..... | 52 |
| Tabela 4.5 - Resultados dos inquéritos feitos no local de estudo. Legenda: A - Chafariz de água doce; B - Chafariz de água salobra; C - Armazenamento de água salobra em tanque caseiro através de viaturas auto-tanques..... | 56 |
| Tabela 4.6: Variação horária da temperatura e velocidade do vento do Solstício de Verão..... | 73 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.7: Variação horária da temperatura e velocidade do vento do Solstício de Inverno..... | 74 |
| Tabela 4.8: Variação horária da radiação total em plano horizontal no Verão e Inverno..... | 74 |
| Tabela 5.1: Tempo solar considerado para os dias em estudo..... | 83 |
| Tabela 5.2: Variáveis fixas utilizadas na modelação numérica..... | 83 |
| Tabela 5.3: Valores nominais dos parâmetros usados na simulação do modelo de destilação solar passiva..... | 87 |
| Tabela I.1: Resultados para o solstício de Verão (21 de Junho)..... | 110 |
| Tabela I.2: Resultados para o solstício de Inverno (21 de Dezembro)..... | 111 |
| Tabela I.3: Radiação total em superfície inclinada para o solstício de Junho e de Dezembro..... | 111 |
| Tabela I.4 a), b) e c) Resultados para o solstício de Verão..... | 114 |
| Tabela I.5 d), e) e f) Resultados para o solstício de Inverno..... | 115 |

Índice de gráficos

| | |
|--|----|
| Gráfico 2.1 - Índice da Incidência da pobreza [14]..... | 9 |
| Gráfico 5.1: Decomposição da radiação solar horizontal em Salamansa, durante o solstício de Verão..... | 84 |
| Gráfico 5.2: Decomposição da radiação solar horizontal em Salamansa, durante o solstício de Inverno..... | 84 |
| Gráfico 5.3: Comparação da radiação solar total em superfície inclinada em relação à radiação total em superfície horizontal durante o solstício de Verão..... | 86 |
| Gráfico 5.4: Comparação da radiação solar total em superfície inclinada em relação à radiação total em superfície horizontal durante o solstício de Inverno..... | 86 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 5.5: Comparação da radiação solar total em plano inclinado no solstício de Verão e de Inverno..... | 87 |
| Gráfico 5.6: Variação de T_w e T_c durante o solstício de Verão..... | 88 |
| Gráfico 5.7: Variação de T_w e T_c durante o solstício de Inverno..... | 88 |
| Gráfico 5.8: Variação de h_{ew} , h_{rw} e h_{cw} no solstício de Verão..... | 89 |
| Gráfico 5.9: Variação de h_{ew} , h_{rw} e h_{cw} no solstício de Inverno..... | 89 |
| Gráfico 5.10: Variação da taxa de produção horária em kg/m ² h para o Verão e o Inverno..... | 90 |
| Gráfico 5.11: Variação da eficiência térmica do destilador proposto durante o Verão e o Inverno..... | 91 |

Abreviaturas

ARE - Agência de Regulação Económica

CEDEAO - Comunidade Económica dos Estados da África Ocidental

DCRS - Dessalinização por congelação através de refrigerante secundário

ECV - Escudos Cabo-verdianos

ED - Dessalinização por electrodialise

EES - *Engineering Equation Solver*

ELECTRA S.A - Empresa de Electricidade e Água, S.A é uma Sociedade Anónima

ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais

FIT - Frente Inter-Tropical

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

INE - Instituto Nacional de Estatísticas

INIDA - Instituto Nacional de Investigação e Desenvolvimento Agrário

INDP - Instituto Nacional de Desenvolvimento das Pescas

INMG - Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica

INGRH - Instituto Nacional de Gestão de Recursos Hídricos

MED - Destilação multi-efeito (*Multi-Effect Distillation*)

MSFD - Destilação multi-estágios (*Multi-Stage Flash Distillation*)

ODM - Objectivos do Milénio.

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONG - Organização não-governamental

ONU - Organização das Nações Unidas

PANA - Planos Ambientais Nacionais

PIB - Produto Interno Bruto

PND - Plano Nacional de Desenvolvimento

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

ROD/OI - Dessalinização por Osmose Reversa ou Inversa (*Reverse Osmosis Desalination*)

SAAS - Serviços Autónomos de Água e Saneamento

TCMA - taxa de crescimento médio anual

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

VCD - Destilação por compressão de vapor (*Vapour Compression Distillation*)

ZEE - Zona Económica Exclusiva

Símbolos romanos

A_b – área da base (superfície da água) [m^2]

A_c – área da cobertura [m^2]

C – calor específico [$J/kg^\circ C$]

E – Correção do tempo [minutos]

g – aceleração da gravidade [m/s^2]

G_o – radiação extraterrestre [W/m^2]

G_{sc} - Constante solar [$1353 W/m^2$]

h_{lg} – coeficiente de transferência de calor convectivo e radiativo da cobertura para o ambiente [$W/m^2^\circ C$]

h_{tw} – coeficiente total de transferência de calor da superfície da água para a cobertura [$W/m^2^\circ C$]

h_{cw} – coeficiente de transferência de calor convectivo da superfície da água para a cobertura [$W/m^2^\circ C$]

h_{ew} – coeficiente de transferência de calor evaporativo da superfície da superfície de água para a cobertura [$W/m^2^\circ C$]

h_{rw} – coeficiente de transferência de calor radiativo da superfície de água para a cobertura [$W/m^2^\circ C$]

h_w – coeficiente de transferência de calor convectivo do revestimento do tanque para a água [$W/m^2^\circ C$]

I_0 – radiação horária extraterrestre [W/m^2]

I_b - Radiação solar directa [W/m^2]

I_T – Radiação solar sobre a superfície inclinada do colector [W/m^2]

I_d - Radiação difusa [W/m^2]

I_s - Radiação solar global no plano horizontal [W/m^2]

k_T – índice de transparência

L – calor latente de vaporização [J/kg]

L_{loc} - Longitude do local [$^\circ$]

L_{st} - Longitude do meridiano de referência [$^\circ$]

m_{ew} – produção horária de destilado [kg/m^2h]

M_{ew} – Produção diária de destilado [kg/m^2dia]

M – massa [kg]

n - Juliano

P – pressão parcial de vapor [N/m^2]

q_k – perdas para o solo

R_b - razão entre a radiação solar directa sobre uma superfície inclinada e a radiação solar directa sobre um plano horizontal

t – tempo [s]

T_a – temperatura do ar ambiente [$^\circ C$]

T – temperatura [$^\circ C$]

U_G – coeficiente de perdas para o solo.

V – velocidade do vento [m/s]

Símbolos gregos

α - absorptividade

θ_z – Ângulo de zénite solar

γ_s – Ângulo de azimuth solar

ω – Ângulo horário solar

\varnothing – Ângulo de latitude

δ – Ângulo de declinação solar

β – Ângulo de inclinação da superfície

γ – Ângulo de azimuth superficial

θ – Ângulo de incidência

ε – Emissividade

ε_{eff} – Emissividade efectiva

σ – Constante de Stefan Boltzmann
[$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$]

η – Eficiência térmica

Sobescritos

b – tanque de água

c – cobertura

w – água

Resumo

O principal objectivo deste trabalho é o estudo da viabilidade técnica e económica da dessalinização da água do mar, utilizando a energia solar, tomando como caso de aplicação uma pequena comunidade rural de Cabo Verde, a vila piscatória de Salamansa, local onde há graves problemas com a disponibilidade de água potável. No entanto, a proximidade do mar e a disponibilidade de energia solar sugerem a dessalinização como processo para mitigar a falta de água.

A dessalinização da água do mar pode ser obtida através de diversas técnicas que podem ser agrupadas de acordo com os princípios em que estes processos se baseiam: processos de dessalinização térmica (destilação solar, destilação multi-estágio, destilação multi-efeito, etc.) e processos de dessalinização por membranas (electrodialise e osmose inversa).

A destilação solar passiva foi a tecnologia de dessalinização estudada neste trabalho e que se pode vir a tornar uma alternativa promissora para um fornecimento regular de água. Por outro lado, o uso de fontes alternativas de energia, como a solar, apresenta-se como uma solução para viabilizar a dessalinização em meios semi-áridos como o deste caso de estudo.

Fez-se uma modelação matemática da unidade de destilação solar proposta utilizando o *Engineering Equation Solver* (EES) como ferramenta para ajudar a resolver as equações de balanço térmico.

O projecto do destilador solar proposto poderá atender às necessidades de água doce para consumo de 18 famílias constituídas por 5 agregados (92 pessoas) e apresenta uma eficiência média diária de aproximadamente 78% no Verão e 77% no Inverno.

Palavras-chave: água, dessalinização, destilação solar, EES, radiação solar, Salamansa-Cabo Verde.

Abstract

The main purpose of this work is to study the technical and economic feasibility of desalination of sea water using solar energy, taking as a case of application a small rural community in Cape Verde, the fishing village of Salamansa, where are serious problems with availability of potable water. However, the proximity of the sea and the availability of solar energy suggest the desalination as process to mitigate the shortage of water.

Desalination of sea water can be obtained through several techniques that can be grouped in accordance with the principles wherein these processes are based: thermal desalination processes (solar distillation, distillation multi-stage, multi-effect distillation, etc.) and the desalination processes by membranes (electrodialysis and reverse osmosis).

The passive solar distillation was the technology of desalination studied in this work and that it might become a promising alternative to a regular supply of water. Moreover, the use of alternative energy sources such as solar, presents itself as a viable solution to desalination in semi-arid as this case study.

There was a mathematical modeling of the proposed solar distillation unit using the Engineering Equation Solver (EES) as a tool to help solve the equations of thermal balance.

The proposed solar distiller's project can comply with the needs of freshwater for consumption of 18 families composed by 5 aggregates (92 persons) and presents a daily efficiency of approximately 78% in summer and 77% in winter.

Keywords: water, desalination, solar distillation, EES, solar radiation, Salamansa-Cape Verde.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A superfície do nosso planeta é constituída por apenas 30% de terra firme. Os 70% restantes são de água, da qual apenas 2,5% é doce e, destes 2,5%, 1% é água doce superficial, 20% são águas subterrâneas e 79% são águas em estado sólido. Estes valores fazem pensar sobre os recursos de água disponíveis e a sua actual utilização [52].

A água é um recurso essencial à vida nos diferentes ecossistemas e é um elemento nuclear para a regulação climática do planeta, através do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global. Contudo, pode tornar-se desfavorável à vida, podendo até dizimá-la, se oferecidas em quantidade inadequada (excesso ou escassez) e qualidade imprópria (por causas naturais ou antrópicas) [49]. O Homem tem necessidade de água de qualidade adequada e em quantidade suficiente para todas as suas necessidades, não só para protecção da sua saúde como também para o seu desenvolvimento económico e social. Assim, a importância do abastecimento de água deve ser encarada sob os aspectos sanitário, ambiental e económico [4 e 6].

A abundância e a carência de água têm tido grandes reflexos na evolução dos povos. Estes sempre tiveram tendência a se fixar em locais onde os recursos hídricos fossem abundantes e de fácil captação. Ali se fixavam e, com o passar do tempo, evoluíam como sociedade [52].

A escassez de água tem aumentado drasticamente nas últimas décadas a nível mundial, sendo no entanto mais evidente nas regiões áridas e semi-áridas, que coincidem muitas vezes com países em vias de desenvolvimento. O mapa de distribuição de água no globo, apresentado na Figura 1.1, evidencia exactamente isto [51].

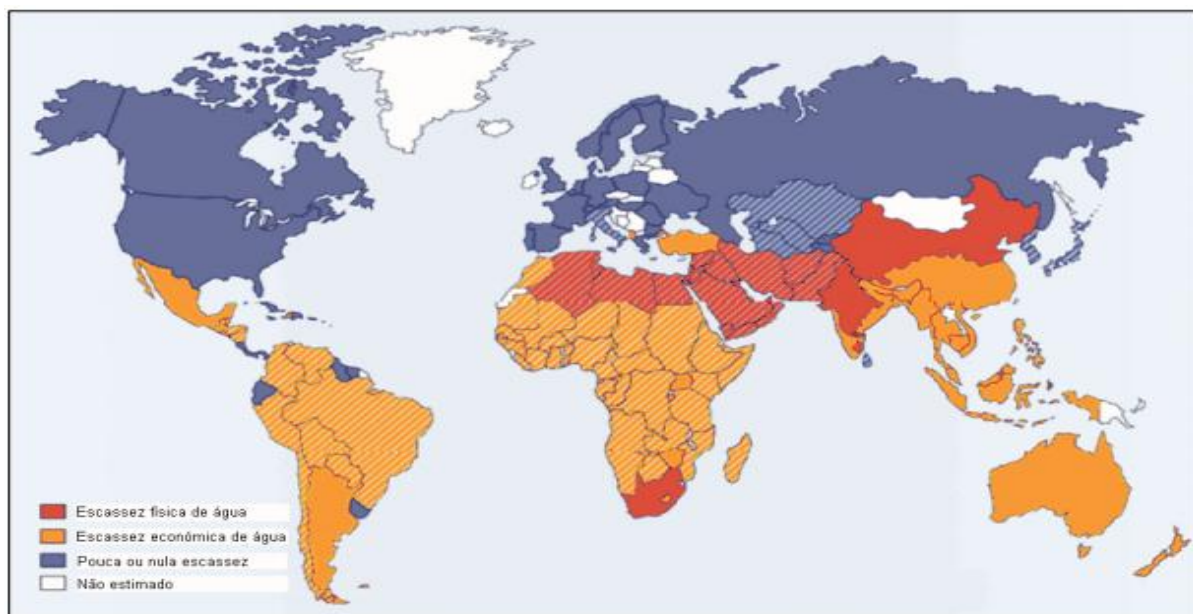


Figura 1.1: Mapa de escassez de água no Mundo [51]

Cerca de 25% da população mundial não tem acesso à qualidade e/ou quantidade satisfatória de água doce. Mais de 80 países encontram-se com graves problemas de água. Num futuro próximo, mesmo os países que nos dias de hoje não enfrentam o problema da escassez de água vão-se deparar com essa realidade [46]. Prevê-se que dentro de 23 anos a maior parte das pessoas não terá acesso a água potável, sendo actualmente as zonas mais afectadas pela falta deste precioso bem, as regiões áridas da Ásia e da África sub-sariana. Deste modo, a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) alertou para a necessidade de racionalizar o consumo de água em todo o Mundo. De acordo com esta organização a procura de água aumentou seis vezes, no século XX, uma vez que a população mundial triplicou [47].

A água das chuvas no ciclo hidrológico tem-se mostrado até hoje suficiente para suprir a maior parte das necessidades da população mundial. Para além do crescimento da população existem diversos factores que comprometem seriamente este equilíbrio, tais como: a mudança do estilo de vida; o uso ineficiente da água; a contaminação da água potável disponível, em consequência da intervenção humana sobre o ambiente e o ecossistema da água; a seca mundial e a desertificação [6].

O problema da pureza e quantidade da água tornar-se-á mais grave no futuro, restando como uma das alternativas, a produção de água doce através dos processos de dessalinização, retirando-a do mar ou das águas salobras dos açudes e dos poços. Esta modalidade de produção de água potável aumentou significativamente nas últimas duas décadas com o

aperfeiçoamento das suas técnicas, mas não pode ser considerado como um novo conceito, uma vez que a ideia de transformar água salgada ou água salobra em água doce tem sido desenvolvida e usada por séculos.

Tudo indica que a dessalinização representará uma das principais fontes de recursos hídricos num futuro próximo, principalmente para países com carências de água potável como Cabo Verde [48].

1.2. Objectivo e estrutura da tese

Esta dissertação tem como objectivo o estudo da viabilidade técnica e económica da dessalinização da água do mar, utilizando a energia solar, tomando como caso de aplicação uma pequena comunidade rural de Cabo Verde, a vila piscatória de Salamansa, local onde há graves problemas de disponibilidade de água potável.

Em países como Cabo Verde, com carências e com problemas de fontes de água doce, a dessalinização da água do mar vem ganhando uma importância cada vez maior, como alternativa de fornecimento de água às populações, para uso doméstico e outros.

Sabendo-se que Cabo Verde tem praticamente durante os 365 dias do ano, muitas horas de exposição solar e que a dessalinização é um processo energeticamente exigente, propõe-se a energia solar porque ela se apresenta, a priori, vantajosa, quer ecológica, quer economicamente para ajudar a resolver este problema, logo de forma sustentável.

O texto desta dissertação está organizado em sete capítulos, nos quais este se inclui, onde é feito um breve enquadramento teórico do tema e são apresentados os seus objectivos.

O capítulo 2 faz várias abordagens sobre o arquipélago de Cabo Verde relativamente à:

- Caracterização física e sócio-económica;
- Principais problemas ambientais encontrados no país;
- Situação dos recursos hídricos, elucidando o problema da escassez de água;
- Exposição dos responsáveis pela produção e distribuição de água potável.

O capítulo 3, intitulado “Estado da Arte”, apresenta uma revisão bibliográfica do tema da dessalinização da água do mar, descrevendo e comparando os diferentes métodos usados actualmente. Também patenteia os custos associados ao processo e os possíveis impactos ambientais derivados do mesmo.

No capítulo 4, denominado “Metodologia” para além de uma caracterização rigorosa do local de estudo, é feita uma selecção do processo tecnológico a desenvolver. A tecnologia de dessalinização estudada neste trabalho é a destilação solar passiva cujas vantagens conduziram à sua escolha como o processo mais adequado para a aplicação pretendida nesse estudo. Faz-se uma descrição detalhada do dispositivo de dessalinização proposto, relativamente à configuração do sistema e à selecção dos materiais. Ainda é feito uma modelação matemática da unidade de destilação solar. O software utilizado para o cálculo dos modelos é o *Engineering Equation Solver* (EES).

No capítulo 5, designado “Apresentação/Análise de Resultados”, são apresentados e analisados os resultados obtidos na simulação realizada.

Por fim, as conclusões são expostas no capítulo 6, e no capítulo 7 as sugestões para os trabalhos futuros.

2. CABO VERDE – CARACTERIZAÇÃO

2.1. Geografia

Cabo Verde é um pequeno estado insular em desenvolvimento. É um arquipélago constituído por dez ilhas e treze ilhéus com uma superfície de 4033 km². Localizado no oceano Atlântico, a latitudes entre os paralelos 17°12' e 14°48' Norte e uma longitude de 22°44' e 25°22' a Oeste de Greenwich e insere-se na denominada faixa climática do Sahel, de clima árido e semi-árido [12 e 13].

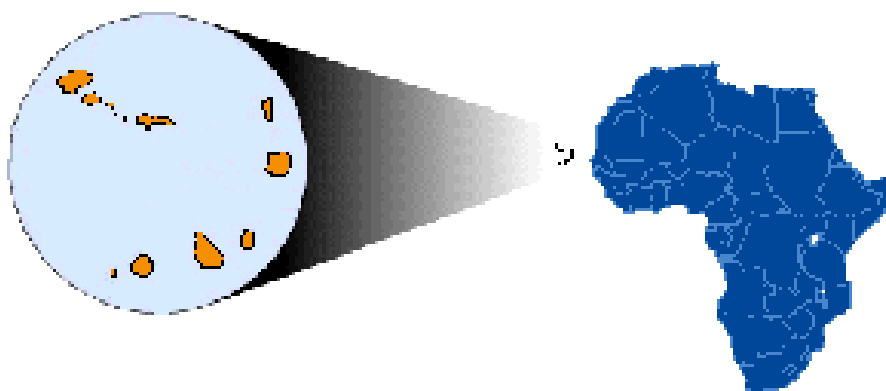


Figura 2.1: Localização geográfica de Cabo Verde [www.caboverde.com]

O arquipélago é constituído por vários ilhéus desabitados e por dez ilhas que se encontram divididas em dois grupos:

- Barlavento: Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia (é despovoada), São Nicolau, Sal e Boa Vista;
- Sotavento: Maio, Santiago, Fogo e Brava.

Esta divisão deriva da posição das ilhas face aos ventos dominantes do Nordeste [49].



Figura 2.2: Divisão do arquipélago de Cabo Verde [23].

Possui uma extensa ZEE, cuja área estimada é de 734000 km² (cerca de 175 vezes superior à área terrestre) e 1020 km de linha de costa caracterizada essencialmente por ser muito acidentada, apresentando nas ilhas mais orientais relevos mais suaves com alguma predominância de costas arenosas [40, 43 e 49].

2.2. Geologia

Do ponto de vista geológico, as ilhas são de origem vulcânica e formaram-se durante os períodos do Terciário e do Quaternário. As rochas dominantes são os basaltos que ocupam mais de 80% da superfície total do arquipélago. As ilhas mais antigas encontram-se no extremo Este do país e distinguem-se por relevos antigos, que culminam a altitudes de 400 m (Sal, Boavista, Maio). As ilhas mais recentes encontram-se na parte oeste e atingem a altitude de 1979 m, no Norte (Santo Antão), e 2829 m no Sul (Fogo) [49].

Devido à sua origem vulcânica as ilhas têm plataformas insulares bastante reduzidas, entre 5 e 10 milhas. Em Santo Antão, São Vicente e Sal a profundidade da plataforma insular é inferior a 200 metros. As ilhas de S. Vicente, S. Luzia e S. Nicolau e os Ilhéus Branco e Raso encontram-se na mesma plataforma representando cerca de 30 % da placa continental de Cabo Verde [43].

Os solos do arquipélago são genericamente esqueléticos e pobres em matéria orgânica, sendo que apenas 10% dos solos são potencialmente aráveis. Actualmente destes terrenos cultiváveis cerca de 95% estão ocupados com culturas de sequeiro e apenas 5% com culturas

de regadio. Os principais produtos cultivados são: feijão, milho, cana-de-açúcar, batata-doce, amendoim, batata, banana, e mandioca [8 e 51].

2.3. Clima

O clima em Cabo Verde é do tipo subtropical seco e varia com a altitude e a exposição aos ventos, submetido ao regime dos ventos alísios do nordeste, com temperaturas moderadas na ordem dos 24 °C e uma fraca amplitude térmica. A temperatura média da superfície do mar é de 23 °C. Os ventos predominantes sopram de nordeste, com uma velocidade entre 5 e 9,7 m/s [16 e 43].

Existe uma curta estação de chuvas (Julho a Outubro) e, deste modo, esteve sempre sujeito a secas periódicas de maior ou menor importância. As primeiras ocorrências de secas com impacto em vidas humanas foram registadas no início dos anos 1500 [6, 16 e 43].

O clima é influenciado pela circulação de grandes correntes aéreas que modificam o carácter das estações aumentando a pluviometria durante a estação húmida (monções, subida da FIT - Frente Inter-Tropical), com ausência de precipitação durante a estação seca (harmatão). Há quatro sistemas a determinar o clima na região e no arquipélago; (i) os anticiclones subtropicais dos Açores e de Santa Helena (ii) as baixas pressões equatoriais; (iii) a Corrente Marítima das Canárias; e (iv) a depressão térmica sobre o continente Africano durante o verão. Estes factores climáticos provocam uma grande variabilidade espaço-temporal na precipitação, incluindo episódios frequentes de secas e a presença de microclimas [49].

No decurso dos últimos vinte anos, o clima de Cabo Verde foi caracterizado pelo acentuar da aridez. Nota-se, em particular: i) a grande variabilidade das precipitações no espaço e no tempo, com uma tendência genérica pela regressão anual da pluviometria total ii) a redução do número de dias de ocorrências pluviosas iii) maiores frequências de chuvas violentas e devastadoras para as culturas e infra-estruturas iv) a diferença climática entre as vertentes a sotavento e a barlavento [37 e 49].

Na tabela seguinte apresenta-se os valores médios anuais de pluviosidades para cada ilha.

| Ilha | Valor médio anual de precipitação (mm) |
|-------------|--|
| Fogo | 495 |
| Santiago | 321 |
| Brava | 268 |
| Santo Antão | 237 |
| Maio | 150 |
| São Nicolau | 142 |
| São Vicente | 93 |
| Boavista | 68 |
| Sal | 60 |

Tabela 2.1: Precipitação média para as ilhas do arquipélago de Cabo Verde [51].

As ilhas de Sal e Boavista são consideradas extremamente áridas, as ilhas de S. Vicente, S. Nicolau e Maio são consideradas áridas, e as restantes apresentam-se com características de ilhas semi-áridas [37 e 51].

Até 2002 os dados agro-climatológicos e hidrológicos eram recolhidos, tratados e difundidos pelo Instituto Nacional de Investigação e Desenvolvimento Agrário (INIDA). A partir dessa data essa missão foi confiada ao Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) e ao Instituto Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (INGRH), respectivamente [16].

O INMG mantém dezassete estações agro-climatológicas, sendo nove em Santiago, duas na ilha do Fogo, duas em Santo Antão, uma em São Vicente, uma no Maio, uma na Boavista e uma em São Nicolau. Todas as estações são equipadas com aparelhos e instrumentos clássicos: pluviógrafos, termógrafos, termómetros molhado/seco, evaporímetros e heliógrafos [16].

2.4. Contexto socioeconómico

A população cabo-verdiana cresceu nos últimos 30 anos a um ritmo diferente nos períodos inter-censitários. Com efeito, a taxa de crescimento médio anual que na década de 1980 foi de 1,5% aumentou para 2,4% na década seguinte, para decrescer entre 2000 e 2010 e atingir um nível de 1,2% devido à diminuição da taxa de natalidade no arquipélago [11 e 33].

| Meio de residência | Ano | | | | | | | | |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1900 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 |
| Cabo Verde | 143.929 | 181.740 | 149.984 | 199.902 | 270.999 | 295.703 | 341.491 | 434.625 | 491.875 |
| Meio Urbano | — | — | — | — | — | — | 150.599 | 234.368 | 303.979 |
| Meio Rural | — | — | — | — | — | — | 190.892 | 200.257 | 187.896 |
| Santo Antão | — | 35.977 | 28.379 | 33.953 | 44.623 | 43.321 | 43.845 | 47.170 | 43.915 |
| São Vicente | — | 15.848 | 19.576 | 20.705 | 31.578 | 41.594 | 51.277 | 67.163 | 76.140 |
| São Nicolau | — | 14.846 | 10.366 | 13.866 | 16.308 | 13.572 | 13.665 | 13.661 | 12.817 |
| Sal | — | 1.121 | 1.838 | 2.608 | 5.505 | 5.826 | 7.715 | 14.816 | 25.779 |
| Boavista | — | 2.779 | 2.985 | 3.263 | 3.569 | 3.372 | 3.452 | 4.209 | 9.162 |
| Maio | — | 2.237 | 1.924 | 2.680 | 3.466 | 4.098 | 4.969 | 6.754 | 6.952 |
| Santiago | — | 77.382 | 59.397 | 88.587 | 128.782 | 145.957 | 175.691 | 236.627 | 274.044 |
| Fogo | — | 23.022 | 17.582 | 25.615 | 29.412 | 30.978 | 33.902 | 37.421 | 37.071 |
| Brava | — | 8.528 | 7.937 | 8.625 | 7.756 | 6.985 | 6.975 | 6.804 | 5.995 |

Tabela 2.2: Evolução da população residente em Cabo Verde por Ilha (1900-2010) [12]

Segundo o recenseamento realizado em 2000 a população de Cabo Verde era de 434 625 habitantes com uma densidade populacional de 108 habitantes/km². Assistia-se a uma crescente concentração das populações nos centros urbanos, que por sua vez se situavam na sua grande maioria nas áreas costeiras [43].

Conforme os dados do Censo 2010, a população cabo-verdiana aumentou para 491875 pessoas residentes em todo o território nacional [11]. Em termos de meios de residência, 62% da população cabo-verdiana mora no meio urbano, enquanto 38% reside no meio rural [33].

O desenvolvimento económico de Cabo Verde é confrontado com enormes dificuldades devido, sobretudo, à falta de recursos naturais e às condições climáticas desfavoráveis à prática de uma agricultura durável. Contudo, a dinâmica de desenvolvimento de Cabo Verde é no sentido ascendente. Desde 2007, Cabo Verde saiu da lista dos países menos desenvolvidos e ascendeu ao patamar de país em desenvolvimento, segundo a classificação das Nações Unidas – um facto pouco comum para uma nação africana, insular e de independência (1975) bastante recente [37 e 49]. Esse avanço revela-se nas performances obtidas relativamente à alfabetização, escolarização de crianças, taxa de cobertura sanitária, acesso aos serviços de saúde e outros [49].

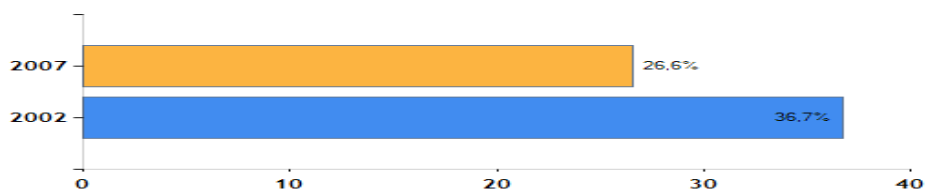


Gráfico 2.1: Índice da Incidência da pobreza [14]

Hoje, 100% das crianças em idade escolar estão matriculadas. O país ocupa a terceira maior posição no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), entre os países da África subsariana (0,736), de acordo com PNUD, Relatório de Desenvolvimento Humano (2007/8) [49].

Os resultados económicos dos últimos anos contribuíram para o avanço de conquistas sociais bastante importantes. A contribuição do capital estrangeiro para investimentos directos em turismo, a cooperação internacional de países como EUA, Japão, China, Luxemburgo, Áustria, Alemanha, Espanha e Portugal, mais as remessas de emigrantes, têm alterado positivamente o ritmo de crescimento económico e desenvolvimento social do país [49].

Cabo Verde depende quase totalmente da importação dos produtos petrolíferos para satisfazer as suas necessidades energéticas. Os combustíveis representam 6% do valor das importações e é a segunda mais importante rubrica nas importações de Cabo Verde, a seguir aos cereais [1].

O mar exerce uma forte influência no tecido socioeconómico cabo-verdiano, podendo-se afirmar que a sobrevivência do cabo-verdiano depende em grande medida do mar, facto que se encontra patente nas trocas comerciais (por via marítima) inter-ilhas e com o estrangeiro, na alimentação e na cultura, sendo várias as actividades que envolvem a utilização do mar como recurso: transporte marítimo de mercadorias e passageiros, turismo, construção e reparação naval, extracção de inertes para a construção civil, dessalinização da água do mar para abastecimento público, pesca, produção de sal e actividades recreativas e desportivas [43].

Para além da insularidade do país, é a dispersão das ilhas que constitui o maior constrangimento económico. Esta obriga à multiplicação das infra-estruturas (transporte marítimo e aéreo entre as ilhas, produção e distribuição de energia e água, etc.), e das instalações necessárias para a prestação de serviços sociais, administrativos e de segurança [1].

A economia de Cabo Verde é orientada principalmente para os serviços. Por outro lado, o sector agrícola joga um papel central, do ponto de vista económico e social, sobretudo em matéria de subsistência e de emprego [49]. A agricultura representa apenas 5% do PIB, por outro lado, este sector representa 45% do emprego e é a principal fonte de renda para cerca de 40% da população activa [37]. Devido a fraca disponibilidade de recursos naturais (água,

solo, vegetação), agravada por uma demografia crescente, o sector só cobre parcialmente as necessidades alimentares (10 a 15% das necessidades em cereais) [49].

A produção alimentar é constantemente deficitária, pois Cabo Verde importa mais de 80 % dos alimentos de que necessita e não se vislumbra uma auto-suficiência alimentar [37]. Assim, as exportações agrícolas são praticamente nulas, excepção feita ao abastecimento esporádico da diáspora com produtos nacionais (grogue e outros) [49].

Portugal é o primeiro fornecedor e o primeiro cliente de Cabo Verde, sendo o parceiro comercial preferencial do arquipélago. Fornece quase 47% das importações do país e é a saída para 58% das exportações de Cabo Verde. O comércio com os países da Comunidade Económica dos Estados da África Ocidental (CEDEAO) é limitado, com menos de 2% das importações e exportações [5 e 37].

Quase 60% da população, tanto urbana como rural pratica a pecuária, principalmente como um meio de subsistência alimentar e financeira [37]. Os benefícios da pecuária situam-se ao nível de rendimentos monetários, da segurança alimentar e financeira, bem como o prestígio social. Para além da pecuária familiar, desenvolveram-se unidades semi-industriais, ao longo das últimas décadas, principalmente no ramo aviário [49].

O sector da pesca constitui um elemento importante em os de contribuição para o emprego, segurança alimentar e economia nacional [49]. Pois, é uma das poucas actividades económicas baseadas nos recursos naturais de que provém produtos de qualidade para exportação ainda que em pequena escala [1].

As ilhas não dispõem de recursos minerais de valor económico apreciável. Os identificados são os basaltos, as pozolanas, os calcários, o sal e as nascentes de água mineral. Não há recursos minerais importantes, mas, em contrapartida os renováveis, como o sol e o vento, são abundantes e de valor inestimável num país forte dependência da importação de derivados do petróleo para satisfação das necessidades energéticas [49]. Uma pequena parte dos produtos de petróleo que circulam nas águas cabo-verdianas destinam-se aos portos do Mindelo (S. Vicente), da Palmeira (Sal) e da Praia (Santiago), onde se localizam os principais parques de armazenagem de produtos de petróleo [43]. A importação, o armazenamento e a distribuição de combustíveis, em todo o território nacional, são asseguradas por duas sociedades privadas - a Shell e a Enacol [16].

A indústria representa apenas uma modesta parte da economia e é caracterizada por pequenas unidades de produção com uma baixa concentração de mão-de-obra. Os principais domínios desta actividade são a indústria alimentar (83 empresas), de couro (7 empresas) e têxtil (8 empresas) [37].

Os limites mais importantes ao desenvolvimento do sector são: i) a raridade dos recursos naturais ii) o custo elevado dos factores água, energia, mão-de-obra iii) a fraca qualificação da mão-de-obra e iv) a diminuta dimensão do mercado [49].

Na última década foi dada especial atenção ao turismo, tendo sido eleito como vector estratégico para o desenvolvimento socioeconómico do país contribuindo com um valor significativo no PIB cabo-verdiano [43 e I4]. O turismo baseia-se na grande diversidade paisagística das ilhas, ilhéus e mar territorial [1]. Com o aumento no turismo torna-se necessário construir infra-estruturas hidráulicas para atender a demanda futura [37].

2.5. Principais problemas ambientais em cabo verde

No caso de Cabo Verde, face aos problemas mundiais, cedo se percebeu da “necessidade de “integrar os princípios do desenvolvimento sustentável nas políticas e programas nacionais e inverter a actual tendência para a perda de recursos ambientais”(ODM:7). Recursos esses que estão sendo cada dia mais ameaçados por fenómenos naturais desfavoráveis.

Em Cabo Verde, o ambiente tem sido, um dos temas mais importantes do Plano Nacional de Desenvolvimento (PND), e por essa razão, o Governo elaborou os Planos Ambientais Nacionais (PANA) [44].

Os principais problemas ambientais que se encontram no arquipélago são comuns a todas as ilhas, surgindo com maior ou menor intensidade, e resultam sobretudo das características naturais do arquipélago (secas frequentes, chuvas torrenciais, ventos fortes, reduzido coberto vegetal, escassos recursos naturais) aliado à crescente pressão antrópica exercida sobre os recursos ambientais (crescimento populacional, migração interna, urbanização, aumento do parque industrial e automóvel, exploração dos recursos vivos e não vivos e o turismo) [43].

A degradação da qualidade do solo é inerente à própria localização geográfica de Cabo Verde e causada pela intensidade e má distribuição das chuvas. Por outro lado, a combinação de

factores como o sobre-pastoreio, a extracção descontrolada de inertes, alta densidade de poços, agricultura de sequeiro nas encostas, construção civil descontrolada, proliferação de lixeiras selvagens, uso indiscriminado de pesticidas e fertilizantes, agravam a degradação de solos [8].

O processo da desertificação em Cabo Verde manifesta-se de forma diferenciada segundo as características físicas das diferentes ilhas do Arquipélago. Nas ilhas planas e arenosas do Sal, Boa Vista e Maio, verifica-se o desaparecimento quase total da cobertura vegetal. Nas outras ilhas, o efeito conjugado da falta de cobertura vegetal, do relevo e da intensidade das chuvas provoca escoamentos torrenciais e erosão dos solos. Esse escoamento superficial provoca, por sua vez, um défice hídrico, pois a água vai directamente para o mar. Por consequência, a fraca infiltração da água das chuvas contribui para a diminuição das reservas de águas subterrâneas [1].

Um dos principais problemas ambientais em Cabo Verde tem a ver com o saneamento básico e o tratamento de resíduos domésticos, industriais e hospitalares. A cobertura geral de esgotos é de cerca de 25%, distribuída entre rede de esgotos (8%), fossas sépticas (5%), latrinas secas (1%) e outros (11%). Os efluentes que não são encaminhados para os locais de tratamento infiltram-se no solo ou escorrem em direcção ao mar. Relativamente à produção de resíduos, estima-se que em média são produzidos 800 g/dia/pessoa de lixo, composto maioritariamente de matéria orgânica biodegradável (70 a 80%). Apesar de se reconhecer os esforços dos municípios para melhorar a recolha dos resíduos, os sistemas de tratamento ainda são insuficientes. Os resíduos mal depositados são arrastados para o mar pelas cheias [8 e 43].

Relativamente à gestão das áreas costeiras, um aspecto importante a ter em conta prende-se com a crescente pressão demográfica junto das áreas costeiras, como resultado da migração massiva das populações rurais em direcção aos centros urbanos (na sua maioria situados no litoral) em busca de trabalho e melhores condições de vida [43]. Devido à falta de um plano de desenvolvimento urbanístico, a instalação dos migrantes nas áreas peri-urbanas não é controlada, o que provoca a construção clandestina de infra-estruturas e descontrolo na gestão de resíduos e no saneamento básico, com impactos negativos na saúde pública. Uma análise mais aprofundada mostra que a acumulação de resíduos nas zonas rurais e urbanas afecta o desenvolvimento turístico, reduzindo assim, as oportunidades geradoras de rendimento [8]. Por outro lado, aliado à pressão demográfica temos a pressão turística, que tem verificado um

crescente aumento nos últimos anos e que se prevê continue a crescer fruto das escolhas feitas pelos sucessivos Governos com vista ao desenvolvimento económico do país [43].

A localização do arquipélago faz com que o mesmo se encontre na encruzilhada do tráfego marítimo mundial, ficando sujeito às implicações ambientais que daí advêm. Pois, são centenas os navios que navegam diariamente na ZEE de Cabo Verde e, estima-se que mais de 50 sejam petroleiros, circulando cerca de 1,9 milhões de barris de petróleo por dia em navios de centenas de milhares de toneladas de deslocamento (120000 - 180000 toneladas). Deste modo, devido ao tráfego marítimo que atravessa as águas cabo-verdianas e ao volume e tipo de mercadorias transportadas, existe um perigo potencial de poluição das águas e costas do arquipélago. Os acidentes em que estejam envolvidos hidrocarbonetos ou outras substâncias perigosas poderão pôr em risco as espécies marinhas e a qualidade da água, interferindo directamente com as actividades da pesca, dessalinização da água do mar, turismo e actividades recreativas e desportivas. Outra questão que constitui motivo de preocupação em Cabo Verde tem a ver com a contaminação provocada pelo inadequado manuseamento dos óleos usados e resíduos oleosos. Os óleos usados resultam dos combustíveis dos motores e máquinas utilizados quer no transporte quer nas mais diversas indústrias. Quando lançados directamente no ambiente ou nos esgotos os óleos usados contaminam os solos, as águas subterrâneas e superficiais e provocam estragos nas ETAR. Contrariamente aos outros municípios, em S. Vicente, faz-se a recolha e armazenamento dos óleos usados, através da ONG Garça Vermelha [8 e 43].

O êxodo e as migrações inter-ilhas provocam um aumento na construção civil, e, consequentemente, um aumento na demanda de materiais de construção que tem conduzido a uma elevada pressão sobre os recursos naturais [8]. A extracção de areia para a construção civil é uma actividade levada a cabo com muita intensidade nas praias de todo o país (nomeadamente nas ilhas de Santiago, S. Vicente e Maio) constituindo um sério problema ambiental para o arquipélago. Esta actividade levou já à destruição total de algumas praias, o que provoca a erosão costeira e perda de habitats marinhos causando o desaparecimento de algumas espécies, diminuindo as áreas de lazer e provocando a intrusão salina nas desembocaduras de algumas ribeiras [43].

Em Cabo Verde, a poluição do ar é reduzida. No entanto, merece atenção o crescimento exponencial do parque automóvel, que se fez sentir principalmente nos últimos anos e tem

contribuído para a diminuição da qualidade do ar, sobretudo nos centros urbanos. É de considerar ainda a poluição do ar pelos aerossóis (geralmente denominados “bruma seca”), provenientes do deserto de Sahara. Esta forma de poluição vem aumentando de intensidade e duração nos últimos anos e tem um impacto negativo sobre a saúde pública e no tráfego aéreo [8].

Todo o arquipélago é vulnerável aos efeitos das alterações climáticas e a uma eventual subida do nível médio do mar, podendo-se encontrar em todas as ilhas locais onde o risco de inundação é considerável pondo em causa a integridade das infra-estruturas existentes no litoral [43].

A dimensão, a descontinuidade do território, o isolamento, os regimes climáticos e oceanográficos fazem com que biodiversidade seja das mais ameaçadas no mundo, havendo elevadas taxas de extinção. De facto, as ilhas são sistemas extremamente sensíveis a qualquer intervenção externa, contudo, apresentam um elevado número de espécies endémicas (exclusivas), muito valiosas no contexto da biodiversidade global. São exemplos, entre outros [5]:

- Plantas: *Phoenix atlântica*, *Tamarix senegalensis*, *Cocculus pendulus*
- Aves: *Calonectris edwardsii*, *Phaethon aethereus*, *Alauda razae*;
- Répteis: *Hemidactylus boavistensis boavistensis*, *Mabuya spinalis salensis*; *Chelonia mydas* e *Eretmochelys imbricata*
- Gastrópodes do género *Conus*: *C. salreiensis*, *C. fuscoflavus*, *C. borgesii*, *C. decoratus*, etc;
- Crustáceos - *Palinurus Charlestoni*
- Cetáceos: *Peponocephala Electra*; *Tursiops truncatus*; *Globicephala macrorhynchus*, *Stenella attenuata*.

Localizam-se ainda neste arquipélago, um dos dez mais importantes recifes de corais do mundo (também um dos dez mais ameaçados), o terceiro mais importante local do mundo para a nidificação de tartarugas comuns (*Caretta caretta*), sendo também o local de reprodução da população de baleias de bossa (*Megaptera novaengliae*) [44].

As causas de base da maioria dos problemas identificados são [8]:

- O deficiente ordenamento do território e urbanístico numa escala desejável;
- A ausência de indicadores ambientais, das normas, valores óptimos e limiares e a falta de conhecimento dos valores actuais, dificultando o seguimento da qualidade ambiental, bem como a fiscalização;
- A deficiente educação, formação, informação e sensibilização ambiental;
- A deficiente legislação, regulamentação, fiscalização e a divulgação das leis vigentes no país;
- A fraca capacidade técnica e administrativa na área do ambiente a nível dos serviços públicos nacional e municipal.

2.6. A situação dos recursos hídricos em cabo verde – a problemática da escassez de água

Em Cabo Verde, o aumento da população, o desenvolvimento urbanístico e o crescente aumento das necessidades para irrigação, turismo e indústria, aliados à seca dos últimos anos, tem provocado situações de carência, que tendem a agravar-se com o tempo, se medidas urgentes e necessárias não forem tomadas [4 e 16].

Pode-se afirmar que, em Cabo Verde, a carência de água em quantidade e qualidade é um indicador de pobreza. As famílias pobres têm, em geral, menos de 15 litros de água por dia, vivendo cerca de 35% da população a mais de 1 km do ponto de abastecimento de água. Isso obriga as pessoas, sobretudo as mulheres e crianças, a disponibilizarem uma parte considerável do seu tempo na procura de água a distâncias cada vez mais longínquas [16].

Os actuais problemas que se levantam no domínio dos recursos hídricos impõem a necessidade de se procurar evitar que a crescente escassez de água possa constituir um obstáculo ao desejável desenvolvimento sócio-económico. A par da procura crescente de formas de mobilizar novos recursos, deve-se identificar todos os meios possíveis de racionalizar a utilização da água, por forma a se obter o máximo de benefício para todos os cabo-verdianos [16].

2.6.1. Recursos disponíveis

O conhecimento sobre as disponibilidades hídricas de Cabo Verde, é muito genérico e superficial [37]. As informações referentes aos furos, nascentes, poços e galerias são recolhidas e armazenadas pelo INGRH num banco de dados informatizado que se encontra numa fase incipiente de construção. Por outro lado, o seguimento da qualidade da água das praias é assegurado pelo Ministério da Saúde, de forma mais ou menos regular [16 e 37].

A disponibilidade total das águas superficiais e subterrâneas pode ser apresentada no quadro seguinte:

| Ilha | Águas superficiais | Águas subterrâneas | | |
|------------|--------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | Bruto (período médio) | Explorável (período médio) | Explorável (período seco) |
| S. Antão | 27 | 28,6 | 21,3 | 14,5 |
| S. Vicente | 2,3 | 0,573 | 0,41 | 0,219 |
| S. Nicolau | 5,9 | 4,2 | 2,5 | 1,5 |
| Sal | 0,7 | 0,37 | 0,1 | 0,5 |
| Boavista | 2,5 | 1,6 | 0,73 | 0,3 |
| Maio | 4,7 | 2,1 | 0,9 | 0,5 |
| Santiago | 56,6 | 42,4 | 26 | 16,5 |
| Fogo | 79 | 42 | 12 | 9,3 |
| Brava | 2,3 | 1,9 | 1,6 | 1 |
| Total | 181 | 124 | 65 | 44 |

Tabela 2.3: Disponibilidade total de águas subterrâneas e superficiais, em milhões de m³/ano [49].

Por todo o país, as disponibilidades superficiais representam cerca de 2,4 vezes dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis tecnicamente exploráveis em períodos médios e, quase 3,5 vezes os recursos subterrâneos tecnicamente exploráveis em períodos secos. No entanto, existem muito poucos cursos de água de superfície permanentes [37].

A hidrografia de Cabo Verde é constituída de leitos de escoamento ocasionais, ou sazonais, formando vales encaixados e escoamentos torrenciais, que normalmente desaguam no mar por um período de horas ou dias. Excepção deve ser feita à ilha de S. Antão, onde alguns cursos de água, alimentados pelas nascentes, mantêm um caudal apreciável durante todo o ano [49].

2.6.2. Mobilização e exploração dos recursos

Os melhores testemunhos da prática de captação de água das chuvas são as cisternas, concentradas, sobretudo, na ilha do Fogo, que captam a água que se escoia dos telhados e de superfícies impermeabilizadas [49]. Geralmente têm uma capacidade de 10 a 15 m³ dedicado ao consumo das famílias rurais [37].

Outro exemplo importante é a barragem do Poilão na ilha de Santiago, que constitui a primeira barragem de Cabo Verde. A barragem tem uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 1,7 milhões de m³ de água dedicada à irrigação de uma área de aproximadamente 70 hectares. No entanto, esta capacidade de armazenamento representa menos de 1% do total do escoamento superficial estimado para a ilha de Santiago [37].

A água natural produzida em Cabo Verde é no essencial de origem subterrânea [49]. Existem diferentes fontes de água potável a partir das seguintes fontes de água subterrânea [37]:

- A água de furos: é principalmente destinada ao consumo humano. Alguns furos são explorados pela Electra na Praia, mas a maioria é pelos serviços municipais. A água captada pelos serviços municipais é difícil de ser contabilizada pois, os medidores instalados são muitas vezes avariados.
- Os poços de água são usados principalmente em zonas rurais. É uma água cuja qualidade não é controlada e é bastante utilizada para a agricultura. Não é contabilizada.
- As águas de nascentes são utilizadas tanto para consumo humano como para irrigação. A captura dessas águas também não é controlada ou contabilizada.

As estatísticas de pontos de água, mais ou menos credíveis, referenciam a existência de 2304 nascentes (incluindo galerias), 1173 poços e 452 furos [49].

Estima-se que 85% dos pontos de captação de águas subterrâneas estão localizados apenas nas ilhas de S. Antão e Santiago. Os dados sobre esses pontos de água ainda são pouco fiáveis, excepto para alguns furos equipados com contadores na ilha de Santiago e controlados pelo INGRH [37].

O número de pontos de água explorados, por ilha, pode ser ilustrado no seguinte quadro:

| Ilha | Número de pontos de água explorado | | | | Caudal explorado (em milhões de m ³ /ano) | | | |
|------------|------------------------------------|------|------|-------|--|--------|--------|--------|
| | Nascente | Poço | Furo | Total | Nascente | Poço | Furo | Total |
| S. Antão | 1056 | 33 | 16 | 1105 | 9,501 | 4,582 | 0,681 | 14,764 |
| S. Vicente | 38 | 292 | 5 | 335 | 0,032 | 0,0356 | 0,064 | 0,132 |
| S. Nicolau | 202 | 41 | 17 | 260 | 1,579 | 0,101 | 0,442 | 2,122 |
| Sal | — | 36 | — | 36 | — | 0,022 | — | 0,022 |
| Boavista | 9 | 55 | 5 | 69 | 0,022 | 0,080 | 0,018 | 0,120 |
| Maio | — | 122 | 13 | 135 | — | 0,569 | 0,162 | 0,731 |
| Santiago | 927 | 579 | 183 | 1689 | 8,257 | 5,500 | 8,787 | 22,544 |
| Fogo | 67 | 15 | 14 | 96 | 0,661 | 0,082 | 0,740 | 1,483 |
| Brava | 5 | — | — | 5 | 0,944 | — | — | 0,944 |
| Total | 2304 | 1173 | 253 | 3730 | 20,996 | 11,292 | 10,894 | 42,862 |

Tabela 2.4: Pontos de água explorados em Cabo Verde [49]

O volume global dos recursos explorados em águas subterrâneas é estimado em cerca de 117,447 m³/d ou seja 42,862 milhões de m³/ano. Desse volume as nascentes contribuem com cerca de 49%, os poços com 26% e os furos com 25%. A Tabela também mostra que a ilha de S. Vicente não tem recursos subterrâneos suficientes para cobrir as suas necessidades. Deste modo, a dessalinização constitui o principal modo de produção para esta ilha [37].

2.6.3. Água potável

A Tabela 2.5 apresenta a percentagem de agregados segundo a principal fonte de abastecimento de água potável, por meio de residência e concelhos.

| FORMA DE ABSTECIMENTO DE AGUA | Agua canalizada rede pública | Agua canalizada, na casa dos vizinhos | Chafariz | Autotanque | Outra fonte (poço, levada, nascente,..) | Total |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|---|------------|
| CABO VERDE | 50,4 | 8,3 | 25,1 | 7,5 | 8,6 | 100 |
| Urbano | 56,7 | 10,0 | 23,9 | 7,8 | 1,4 | 100 |
| Rural | 38,2 | 5,0 | 27,4 | 6,7 | 22,5 | 100 |
| Ribeira Grande | 78,8 | 3,4 | 10,8 | 0,9 | 6,0 | 100 |
| Paul | 70,9 | 9,6 | 7,3 | 0,5 | 11,4 | 100 |
| Porto Novo | 60,8 | 4,8 | 24,2 | 2,7 | 7,2 | 100 |
| S. Vicente | 54,6 | 12,9 | 18,7 | 11,4 | 2,2 | 100 |
| Ribeira Brava | 56,3 | 1,6 | 35,0 | 1,7 | 5,0 | 100 |
| Tarrafal de S. Nicolau | 75,4 | 1,5 | 18,3 | 0,8 | 4,0 | 100 |
| Sal | 46,8 | 1,2 | 37,7 | 13,5 | 0,6 | 100 |
| Boavista | 28,4 | 1,1 | 49,8 | 18,6 | 1,9 | 100 |
| Maio | 70,1 | 8,3 | 15,8 | 4,4 | 1,1 | 100 |
| Tarrafal | 60,7 | 7,9 | 18,7 | 7,6 | 5,0 | 100 |
| Santa Catarina | 39,4 | 7,4 | 23,3 | 8,1 | 21,4 | 100 |
| Santa Cruz | 57,0 | 12,7 | 7,7 | 4,4 | 18,0 | 100 |
| Praia | 45,2 | 10,6 | 34,9 | 7,5 | 1,6 | 100 |
| S. Domingos | 29,6 | 1,7 | 53,7 | 3,5 | 11,5 | 100 |
| Calheta de S. Miguel | 52,2 | 6,0 | 6,8 | 7,7 | 27,0 | 100 |
| S. Salvador do Mundo | 5,7 | 1,4 | 30,9 | 15,6 | 46,3 | 100 |
| S. Lourenço dos Órgãos | 56,4 | 7,8 | 13,2 | 2,1 | 20,4 | 100 |
| Ribeira Grande de Santiago | 46,4 | 4,5 | 15,9 | 7,6 | 25,4 | 100 |
| Mosteiros | 40,7 | 2,4 | 20,4 | 0,4 | 36,0 | 100 |
| S. Filipe | 58,2 | 7,9 | 12,8 | 1,6 | 19,2 | 100 |
| Santa Catarina do Fogo | 33,9 | 3,6 | 18,0 | 12,0 | 32,4 | 100 |
| Brava | 63,3 | 9,7 | 17,8 | 2,0 | 7,1 | 100 |

Tabela 2.5: Agregados segundo a Principal Fonte de Abastecimento de Água por concelho – Censo 2010 [13]

Como se pode verificar através da Tabela 5, em Cabo Verde 58,7% da população abastece-se através de água canalizada por rede pública sendo que desse valor 50,4% abastece na sua própria casa e os restantes 8,3% em casa dos vizinhos. Por outro lado, 25,1% da população abastece-se através de chafarizes, 7,5% através de autotanques e 8,7% através de outras formas de abastecimento (poço, levada, nascente,...). Ou seja, aproximadamente 84% da população tem acesso ao abastecimento de água por um sistema mais ou menos seguro (ligações domiciliárias e chafarizes) e 16% da população abastece de forma mais ou menos precária, quer através de autotanques, poços, nascentes ou ainda através de levadas.

O abastecimento de água às populações urbanas processa-se da seguinte forma: 66,7% através de água canalizada (rede pública), 23,9% através de chafarizes, 7,8% através de autotanques e 1,6% através de outras formas de abastecimento.

Em relação ao abastecimento de água às populações rurais: 43,2% através de ligações domiciliárias, 23,4% através de chafarizes, 6,7% através de autotanques e 22,7% através de outras fontes de abastecimento.

Com todos os constrangimentos com os quais a população rural confronta para se abastecer em água potável, é evidente que é escusado falar-se de poupança de água no meio rural para fins de abastecimento, na medida em que eles, melhor do que ninguém, conhecem o custo do acesso a uma lata de água [16].

A situação varia de ilha para ilha, concelho à concelho e ainda do meio urbano à rural. Segundo o INE, 91,3% da população tem acesso a uma fonte de água potável: 98,4% em meio urbano e 77,3% em meio rural. A situação é mais favorável no meio urbano onde apenas 9,4% da população abastece em condições precárias, do que no meio rural, onde a percentagem é de 29,4%.

O consumo médio de água potável para as populações ligadas a rede é da ordem de 50 litros/habitante/dia, para as ligações domiciliárias, 15 litros/habitante/dia, para os utilizadores dos fontanários, com variação entre 7 e 25 litros. Estima-se que o consumo total de água potável no país seja cerca de 13 milhões de m³ por ano [37].

As perdas entre a produção e distribuição de água também apresentam altos índices sendo que o total de perdas nas ilhas é de 29,8% do volume total de produção de água [49]. Particularmente, o estado defeituoso e obsoleto de grande parte das redes de distribuição possibilita perdas consideráveis [16].

2.6.4. Qualidade

O abastecimento de água nas zonas urbanas não é contínuo. O período de fornecimento de água potável, pelos operadores do serviço público, em geral, não ultrapassa as 4 horas diárias [49]. Desta forma, as famílias são obrigadas a conservar quantidades consideráveis de água em casa, em geral em condições precárias. Este facto, em conjunto com fracos hábitos de higiene e a necessidade de economizar a água ao máximo, aumenta o risco da contaminação das águas domésticas. O custo da água é também um factor inibidor do consumo de água potável. Não raras vezes as populações dispõem de infra-estruturas públicas de abastecimento de água mas preferem abastecer-se em levadas, poços abertos e outras fontes tradicionais

onde a qualidade da água é duvidosa. Em contrapartida a utilização da água é gratuita. Isso de certa forma está ligado também a uma deficiente educação sanitária. As populações nem sempre relacionam a qualidade da água com doenças do tipo diarreia, cólera, poliomielite e outras [16].

No que concerne ao controlo da qualidade e tratamento da água, são realizados de forma muito irregular, devido principalmente à: i) falta de pessoal capacitado ii) fraca capacidade operativa dos laboratórios iii) rotura constante de stock de reagentes e iv) elevada mobilidade de quadros afectos à área [49].

A falta de mecanismos claros de fiscalização e acompanhamento é por demais preocupante. Análises dispersas, realizadas pelo INGRH, demonstram a presença de coliformes fecais em muitas amostras e a presença de nitritos e nitratos, que podem ser indicadores de poluição recente ou remota [49].

Os recentes casos de cólera e o facto de doenças diarreicas que constituem uma das causas principais de morbilidade e mortalidade geral, indiciam-nos que a qualidade da água, para consumo humano, nem sempre é garantida [49].

Em termos de laboratórios de referência, apenas o do INGRH está habilitado a verificar e acompanhar o processo de tratamento nos diversos concelhos do país. Em 2004, foram elaboradas as normas nacionais sobre a qualidade da água. Estas estão a ser objecto de revisão, já que foram detectadas algumas incongruências susceptíveis de pôr em causa a sua aplicação. O Decreto-Lei n.º 08/2004, de 23 de Fevereiro, que classifica a água como um bem, estabelece os critérios, as normas de qualidade da água, os sistemas de controlo, o regime sancionatório e as medidas de salvaguarda, tendo como objectivo proteger o meio aquático e melhorar, na generalidade, a qualidade da água para consumo humano. As normas nacionais sobre a qualidade da água, contidas nesse Decreto-Lei, apesar de representar um passo importante, não lograram os resultados preconizados com a sua aprovação [49].

Os municípios de S. Vicente, Sal e Praia (que disponibiliza cerca de 50% das necessidades de água para consumo doméstico), têm menos problemas devido ao melhor controlo da qualidade da água. Nos outros municípios da ilha de Santiago e nas ilhas de Santo Antão, São Nicolau e Maio, a qualidade de água vem decaindo, sobretudo nas zonas litorais, face à salinização da água devido à intrusão salina [8].

Foram instalados pequenos laboratórios de controlo da qualidade da água, equipados para medir a temperatura, o pH, a condutividade, o cloro residual e o número de coliformes. No entanto, nenhum desses laboratórios funciona completamente, seja devido à falta de reagentes, seja devido à falta de pessoal, ou, por constrangimentos de outra ordem. Recorre-se a análises comparadas com padrões da Organização Mundial da Saúde (OMS) [16].

O único tratamento realizado é a cloração. Em alguns sistemas, a cloração faz-se com alguma regularidade, noutros, faz-se raramente e noutros ainda, não se faz. Deve-se pois concluir que uma grande parte da água consumida é de qualidade duvidosa. [16].

As populações normalmente não participam nas operações de manutenção das infra-estruturas de abastecimento de água. Nos sistemas de abastecimento de água no meio rural, existe um vendedor/vendedeira de água cuja principal tarefa é a cobrança de uma tarifa de água e a limpeza do local. Algumas vezes realizam pequenos reparos e procedem à cloração da água. O vendedor/vendedeira é remunerado pelo fornecimento de tais serviços [16].

2.6.5. A relação entre a água e os sectores de actividades

A água é essencial para o desenvolvimento do sector do turismo. A quantidade e a velocidade de instalação desses empreendimentos criam uma desfasagem natural entre a oferta e a procura por recursos hídricos. As infra-estruturas públicas de abastecimento de água não têm capacidade de resposta imediata, ou adequada, para satisfazer às necessidades dos novos clientes e assim, estes têm desenvolvido soluções autónomas que incluem a produção de água dessalinizada nos seus planos de investimento. Existem dezenas de projectos de construção de *resorts* turísticos que dispõem das suas próprias unidades dessalinizadoras. Estima-se que a capacidade média instalada nessas unidades ascende a 1000 m³/dia, o que totaliza cerca de 10000 m³/dia equivalentes a 3 milhões de m³/ano. Embora estes números não sejam fiáveis, é evidente que estas produções traduzem-se directamente numa perda de lucro para as concessionárias locais de abastecimento de água.

A origem da água para irrigação é no essencial de galerias e captações aluviais que chega às parcelas gravitariamente. Em seguida vem a água bombada a partir de poços e, por último, a água de furos. Estima-se que, actualmente, exploram-se dessas captações, cerca de 60000 m³/d para irrigar cerca de 1600 ha. Isso quer dizer que de 50% do volume da água explorada é

consumida na irrigação [49]. A água para rega é sujeita a uma taxa de exploração de 8 ECV (oito cêntimos portugueses).

De acordo com o último censo, o número total de bovinos aumentou para 646210. Não existem pontos de água específicos para o gado, que se abastecem principalmente nas fontes, nos pontos de águas agrícolas ou nos pontos de água potável. As necessidades do país para o gado são estimadas em 1 896 m³/d [37].

Há que realçar que se dispõe de pouca informação sobre relação das indústrias com os recursos hídricos. As informações sobre as quantidades de águas utilizadas e restituídas pelas diferentes unidades industriais não são disponíveis. A maior parte das unidades industriais concentra-se nas cidades da Praia e do Mindelo. O abastecimento de água faz-se através da rede pública ou de forma autónoma. Infelizmente, as preocupações ambientais (relação água/indústria) não são tidas suficientemente em conta e as leis existentes são pouco ou não respeitadas. Se não forem tomadas disposições, em relação aos usos industriais, podem constituir uma ameaça para a preservação da qualidade dos recursos hídricos [49].

2.6.6. Produtores e distribuidores de água

Nos principais centros urbanos, a produção e distribuição de água são asseguradas por uma empresa pública/privada, a ELECTRA. Para outros centros, a produção e distribuição da água são asseguradas pelos serviços autónomos municipais. Existem, ainda, pequenos operadores privados que explorando o sistema de dessalinização da água do mar e alguns furos subterrâneos, participam e completam a de produção e distribuição da água em Cabo Verde [49].

A Electra S.A. é uma sociedade anónima que tem por objectivo a produção e a distribuição de água potável, em S. Vicente, Sal, cidade da Praia em Santiago e Vila do Sal-Rei na Boavista, com uma taxa de cobertura de 50%, bem como a produção e distribuição de electricidade em todo o território de Cabo Verde, com uma taxa de cobertura actual de 75% [4 e 5]. A Electra dispunha em 2010 de 3 centrais de produção de água dessalinizada e explorava 6 furos de captação de águas subterrâneas [19]. Produziu, no mesmo ano, 4674848 m³ de água, sendo 4315950 m³ de água dessalinizada (92% do total) e 358898 m³ de água de origem subterrânea (8%) [19].

A Electra S.A. é a única empresa de produção e distribuição de água potável regulamentada em regime de exclusividade, ao abrigo de um contrato de concessão assinado com o Estado de Cabo Verde. Por outro lado, a maior parte dos projectos são financiados graças à cooperação internacional e, a sua implementação leva um certo tempo [37 e 49].

Cabo Verde tem, de longe, as tarifas de água mais caras de África e, entre as mais caras do mundo. Os preços elevados reflectem a escassez de recursos hídricos, o que leva a que o país dependa da dessalinização para cerca de 85% da produção. Além disso, o custo do processo de dessalinização, que consome muita energia, é particularmente elevado, devido à sua dependência em relação à geração de energia, cujos custos elevados reflectem, por seu lado, a dependência em relação à geração a diesel, em pequena escala, e à cara importação de gasóleo [2]. A produção de água dessalinizada consome cerca de 10% da energia eléctrica produzida em Cabo Verde [18].

A entrada no mercado da água de empresas públicas e privadas, implicou a criação de uma entidade reguladora da água (ARE – Agência de Regulação Económica), com a função de enquadrar estes sectores de prestação de serviços, estabelecendo critérios para a definição dos preços e fiscalizando as entidades gestoras, em particular, tendo em conta os objectivos de qualidade dos serviços. Em 2007 foi estabelecido o seguinte tarifário de água pela ARE, aplicável à Electra [49]:

| Escalões | Tarifa base (ECV/m3) | Tarifa com IVA (ECV/m3) |
|--|----------------------|-------------------------|
| Doméstico | | |
| <= 6m3 | 220,00 | 226,60 |
| > 6 e <= 10 m3 | 307,96 | 317,20 |
| > 10 m3 | 384,95 | 396,50 |
| Indústria | | |
| Aplicável às empresas e utilizações industriais em fábricas, oficinas e instalações congéneres. | 330,10 | 340,00 |
| Turismo | | |
| Aplicável aos hotéis, pensões e outros estabelecimentos congéneres. | 384,95 | 396,50 |
| Carácter Social | | |
| Aplicável aos hospitais, fontanários públicos, associações de carácter social sem fins lucrativos. | 220,00 | 226,60 |
| Comércio e Serviços | | |
| Aplicável aos serviços públicos, embaixadas, serviços consulares, estabelecimentos comerciais públicos e privados, empresas de navegação aérea e marítima, armazéns. | | |
| <= 20 m3 | 330,10 | 340,00 |
| > 20 m3 | 384,95 | 396,50 |
| Auto-tanques I | | |
| Aplicável no fornecimento por auto-tanques a hospitais, fontanários públicos, associações e instituições de carácter social sem fins lucrativos. | 220,00 | 226,60 |
| Auto-tanques II | | |
| Aplicável no fornecimento por auto-tanques para outros usos. | 330,10 | 340,00 |

Tabela 2.6: Tarifário da água com incidência do IVA, de acordo com a ARE [49]

A situação financeira da Electra é preocupante. As tarifas cobradas pelos serviços de água são consideradas muito altas em relação à baixa satisfação da população. O retorno financeiro sobre os investimentos é prejudicado pela baixa capacidade de pagamento da população. Essa percepção de caro induz a práticas de ligações ilícitas de água e irregularidades nas contas [49].

Para além da Electra S.A, em Cabo Verde existem, neste momento, 5 operadores que prestam serviço público no sector da produção da água dessalinizada para o abastecimento às populações e à indústria: i) as Águas de Ponta Preta Lda ii) as Águas do Porto Novo iii) Serviço Autónomo de Água e Saneamento do Maio e iv) Serviço Autónomo de Água e Saneamento de Santa Cruz. As unidades de produção distribuem-se pelas ilhas do Sal, S. Vicente, Boavista, Maio, S. Antão (Porto Novo), Santiago e Maio. Três tipos de tecnologias são utilizadas: i) método de compressão mecânica de vapor; ii) osmose inversa e iii) evaporação multi-efeitos (actualmente fora de serviço) [49].

Os SAAS são serviços municipais autónomos de água e saneamento, que gerem e operam os sistemas de produção e distribuição da água, nos chamados centros secundários, com excepção de Sal e Boavista. Nos chamados centros secundários, não abrangidos pela Electra, foram criados serviços municipais de água e saneamento, que geridos pelos municípios através de contractos de concessão. Estima-se que estes serviços são responsáveis pelo abastecimento de água e saneamento de aproximadamente 50% da população de Cabo Verde. O primeiro SAAS foi fundado em Maio de 1995, no município de Santa Cruz. Posteriormente, muitos serviços autónomos foram criados nos municípios rurais. Água Brava é uma empresa de gestão municipal da água criada em 2001 que tem a particularidade de combinar os serviços de duas ilhas, Fogo e Brava [37].

Ao nível da Electra é possível diferenciar a água fornecida pelas diversas utilizações. Já no concernente aos restantes operadores é muito difícil a diferenciação da água utilizada para o abastecimento, irrigação e outros usos e dentro dessas rubricas proceder a catalogação dos utilizadores. Não existe uma base de dados sobre a problemática da água e da gestão de riscos associados. Os dados existentes são dispersos e não sistematizados [49].

2.8. Recursos renováveis em cabo verde

O resultado sumário da caracterização do recurso solar nas ilhas é dado pelo mapeamento da radiação global, que se apresenta na Figura 2.3.

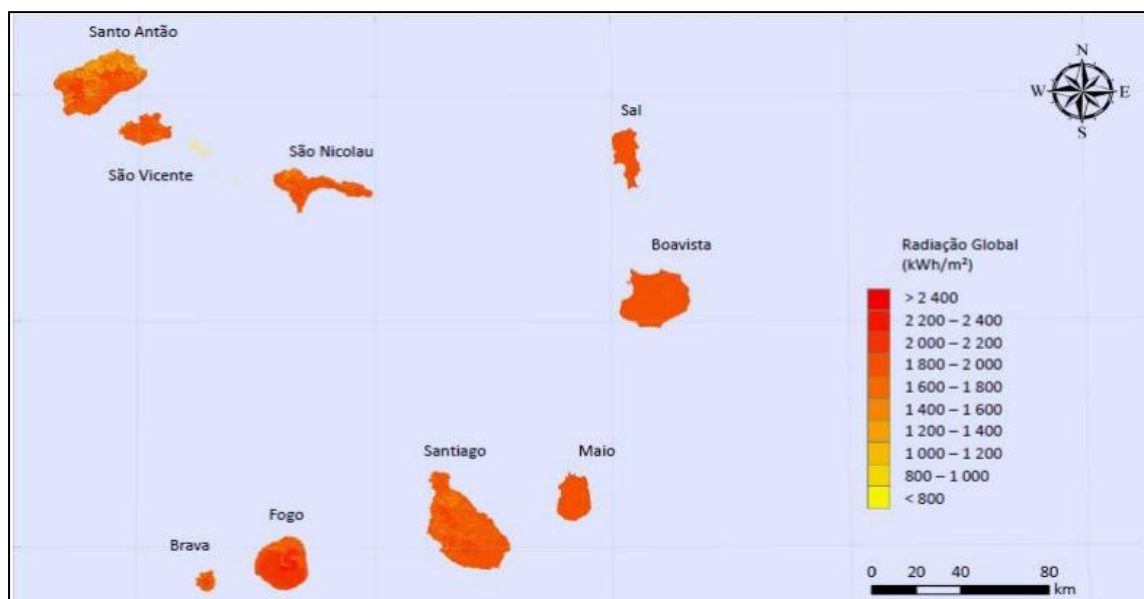


Figura 2.3: Potencial de energia solar em Cabo Verde [22].

Do mapeamento do recurso solar pode-se afirmar que Cabo Verde tem um recurso solar abundante, já que há praticamente 365 dias de muitas horas de exposição solar. Em termos de média anual, grande parte do território apresenta uma radiação global entre os 1800 e os 2000 kWh/m²/ano, para a inclinação e exposição natural do terreno. Relativamente ao número de horas de sol no território, mais de metade do território apresenta um potencial de mais de 3750 horas de sol por ano. Refira-se que as máximas radiações globais em plano horizontal na Europa registam valores na ordem dos 1700 kWh/m²/ano, o que demonstra que Cabo Verde tem um recurso bastante superior ao recurso solar europeu, local onde o investimento em tecnologia solar tem vindo a aumentar desde a última década [3].

Em Cabo Verde a energia fotovoltaica como produção industrial começou nos finais de 2010, com um parque de 5 megawatts na cidade da Praia, Santiago e outro parque de 2,5 megawatts na ilha do Sal [19].

Também relativamente à energia eólica foram montados parques com capacidades aceitáveis em S. Vicente de 7 megawatts, em Praia-Santiago de 10 megawatts e no Sal de 8 megawatts, todos inaugurados em finais de 2011 [19].

3. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo será feito uma abordagem sobre o conceito de dessalinização, os possíveis impactes ambientais assim como os custos associados a esta técnica. Será feito ainda uma descrição e caracterização dos diferentes métodos usados actualmente e a comparação entre eles.

3.1. Dessalinização da água do mar

Actualmente é nos mares que se encontra a principal solução para suprir os consumos futuros, já que, a maior quantidade de água encontra-se nos oceanos, ou seja, sob a forma de água salgada, que corresponde a 97% [9 e 30]. Uma vez que a escassez de água potável está tornando-se um obstáculo para o futuro da humanidade, a utilização dos oceanos pode ser uma solução para suprir a falta de água doce. [20].

O desejo do Homem de transformar a água salgada em água doce remonta à antiguidade. Aristóteles preocupando-se com o problema há 2300 anos, costumava explicar aos seus alunos que “ a água salgada, quando passa a vapor torna-se doce e o vapor não produz água salgada depois de se condensar [30].”

A dessalinização da água do mar ou salina consiste na remoção de sais dissolvidos na água a níveis ou concentrações que possibilitam a sua utilização tanto para o consumo humano como para outras actividades desempenhadas pela água doce. Esta técnica é muito comum em países ou zonas do litoral com escassez de fontes de água doce, como Cabo Verde, tendo como única alternativa a utilização da água do mar como fonte de obtenção de água doce [9].

A água do mar possui salinidade de 3500 – 4200 mg/l enquanto a salinidade da água doce é inferior a 500 mg/l [30].

A prática da dessalinização está em franca expansão e estima-se que haja aproximadamente 15000 estações de dessalinização da água em mais de 120 países e este número tende a aumentar. A maioria destas estações encontra-se localizada principalmente nos países do Médio Oriente, nos Estados Unidos da América e Espanha [9].

A água potável obtida da dessalinização da água do mar antes de ser distribuída pela rede pública tem de preencher todos os requisitos pré-estabelecidos por organismos internacionais como a OMS, ou organismos administrativos que regulamentam a qualidade de água. A água natural contém sólidos dissolvidos como cloreto de sódio, bicarbonato de cálcio, sulfato de

magnésio e outros que existem naturalmente. Uma amostra de água que esteja desprovida de tais substâncias tem um sabor insípido, e não é apropriada para consumo humano. Também, se tiver uma concentração elevada como a água do mar terá um gosto salgado. A água que é destinada para consumo humano terá que ter um equilíbrio na concentração dos sais dissolvidos. Uma água puramente dessalinizada é ácida e corrosiva, por isso, tem de ser feito algum tratamento para que esta seja moderadamente alcalina e mais apropriada para o consumo humano, antes de ser distribuída pela rede de abastecimento. Neste caso, um dos procedimentos normalmente adoptado no tratamento da água doce produzida por dessalinização é a sua mistura com uma outra água que contém sólidos dissolvidos, conferindo-lhe um certo equilíbrio em termos de sais dissolvidos e tornando-a mais apropriada para consumo [9].

Para a dessalinização da água do mar foram desenvolvidos vários processos que serão destacados de seguida.

3.2. Métodos de dessalinização da água

Todo o processo de dessalinização da água baseia-se na tecnologia da engenharia química, em que há um caudal de água salgada que alimenta o sistema aplicando-se neste uma determinada energia em forma de calor, electricidade ou pressão de água e por último há dois caudais de saída, uma correspondente a água dessalinizada que é o produto pretendido e outro que é o concentrado ou rejeitado [9 e 32].

A Figura 3.1 é uma simplificação da dessalinização da água.

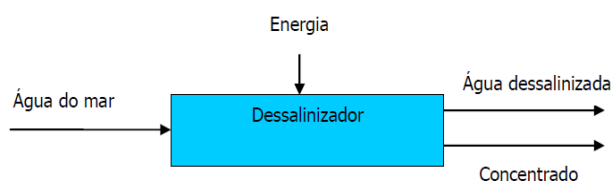


Figura 3.1: Esquema geral do princípio da dessalinização da água [9].

Existem diversos processos de dessalinização da água e podem ser agrupados em dois grupos [9]:

- Processos de dessalinização térmica;
- Processos de dessalinização por membranas.

3.2.1. Processos de dessalinização térmica

O processo térmico corresponde ao processo natural do ciclo da água, ou seja, a água salgada aquece, evapora, condensa e precipita sob a forma de água potável.

Para evaporar a água é necessário atingir-se uma temperatura adequada em relação à temperatura ambiental e, ao mesmo tempo, assegurar uma grande quantidade de energia para manter o processo. Estes métodos são, por isso, frequentemente encontrados em países do Médio Oriente, onde abunda o petróleo, que é normalmente o combustível utilizado para produzir a energia eléctrica, fonte de energia que alimenta o processo [52].

Nos processos de dessalinização térmica, o exemplo mais simples é a destilação da água. O princípio da dessalinização da água por destilação é muito simples. A água salina é aquecida para gerar um feixe de vapor que é recolhido e depois condensado resultando assim numa água não salina. Existem diversas tecnologias de dessalinização por destilação dos quais destacam [27]:

- Destilação multi-estágios;
- Destilação múltiplo efeito;
- Destilação por compressão de vapor;
- Destilação solar

Nos processos térmicos existem também outros métodos diferentes das destilações mencionadas. Esses processos baseiam-se na refrigeração da água salina a fim de obterem gelo que é isento dos sais. Estes métodos são compostos por diferentes etapas durante a dessalinização da água salina. Há uma fase em que há refrigeração da água salina para formação de cristais de gelo, há uma outra fase de remoção dos cristais de gelo flutuantes e em seguida aplica-se a energia térmica para derreter o gelo formado que é desprovido dos sólidos dissolvidos. Estes processos de dessalinização também são referidos por processos de cristalização dos quais se destacam [28]:

- Congelação em vácuo;
- Dessalinização por congelação através de refrigerante secundário
- Dessalinização por formação de hidratos de gás ou clatratos.

3.2.1.1. Destilação por energia solar

A destilação solar embora utilize calor cedido gratuitamente pela natureza, requer amplas áreas de terreno para exposição da água ao sol, razão pela qual se restringe à produção de reduzidos volumes de água doce [30].

A destilação solar tem sido usada durante muitos anos e a sua tecnologia é muito simples sendo a Figura 3.2 a ilustração do método. Neste método a água do mar é depositada dentro de um tanque. Este tanque é apetrechado de uma superfície negra que absorve calor e revestido com placas de vidro transparente que permitem a entrada de radiação solar. O calor proveniente da radiação solar aquece e evapora a água do mar. O vapor desprovido de sais dissolvidos é condensado na superfície de vidro e recolhido em água destilada. Este método de destilação pode ser considerado como destilação de único efeito [9].

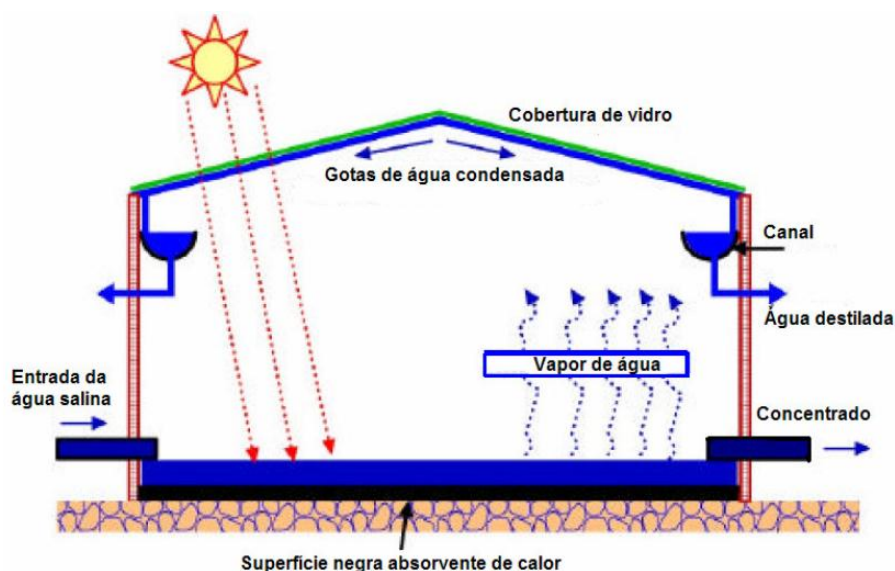


Figura 3.2: Ilustração de um sistema de destilação solar [9].

A destilação solar corresponde ao método de dessalinização aplicado neste trabalho e será alvo de uma descrição mais detalhada no capítulo seguinte.

3.2.1.2. Destilação multi-estágios

Consiste numa série de câmaras onde a evaporação da água salina resulta da pressão aplicada. Atualmente correspondem a mais de 40% da capacidade de dessalinização mundial [54].

A destilação multi-estágios, MSFD (*Multi-Stage Flash Distillation*), a água salina é aquecida e vaporizada em várias câmaras procedendo em seguida a recolha da água destilada pela

condensação do vapor. A água salina que é aquecida entra numa primeira câmara considerada o primeiro estágio [9]. A elevada temperatura que se faz sentir no interior da primeira câmara faz com que uma parte da água vaporize instantaneamente [52]. O vapor é recolhido sob a forma de destilado através do condensador da câmara [9]. A salmoura restante passa para a fase seguinte, onde o processo ocorre agora a temperatura de operação inferior à anterior. Esta diminuição da temperatura deve-se à diminuição de pressão entre fases consecutivas [52]. O processo repete-se sucessivamente por diversas câmaras, considerados estágios do processo, até que se atinge a pressão atmosférica e até que a salmoura atinja valores de concentração de sais muito elevados, sendo esta enviada para o meio receptor. O condensador é arrefecido pela própria água do mar que alimenta o sistema [9 e 52].

Podem existir n etapas de vaporização que influenciarão o grau de aproveitamento da corrente de água salgada. Tipicamente, este método de destilação pode conter quatro a quarenta câmaras onde se realizam o aquecimento, a evaporação e a condensação dos vapores e cada extracção do destilado numa câmara representa um estágio do processo sendo, por isso, este método designado por destilação multi-estágio [30].

A Figura 3.3 é um diagrama para elucidar este método de destilação.

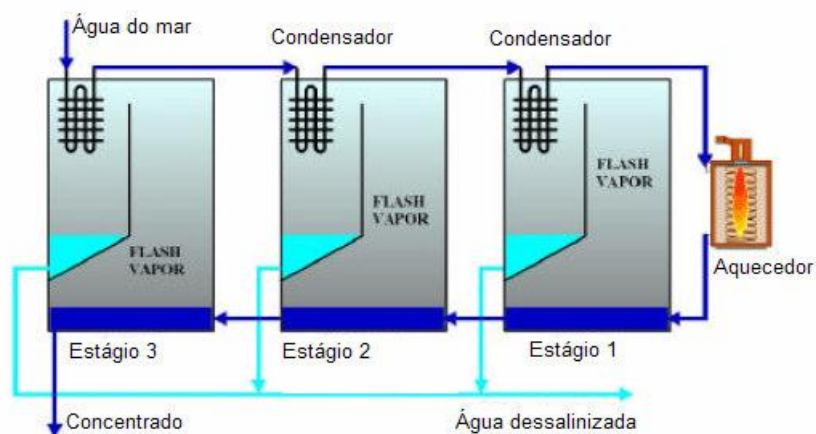


Figura 3.3: Diagrama simplificado da destilação multi-estágios [9].

A MFS usa qualquer tipo de fonte de energia e tem capacidade para tratar uma grande quantidade de água. No entanto, é uma técnica muito dispendiosa uma vez que necessita de uma grande quantidade de energia para alimentar o processo [52 e 54].

3.2.1.3. Destilação multi-efeito

A destilação multi-efeito, MED, (*Multi-Effect Distillation*) emprega um certo número de estágios, normalmente entre 8 e 12, para produzir quantidades cumulativas de água destilada. Cada estágio é caracterizado por um recipiente (vaso) de pressão, atravessado por um feixe de tubos. Cada recipiente, por sua vez, tem uma pressão ambiente ajustada a níveis mais baixos do que a pressão atmosférica, de forma a permitir a ebulição da água em temperatura inferior àquela necessária ao nível do mar [32].

O processo MED é semelhante ao de MSFD com a exceção de que o vapor obtido no primeiro compartimento através do aquecimento dos jactos de água salina é utilizado para aquecer e evaporar a água salina no compartimento seguinte. A fracção de água que não foi evaporada num compartimento é dirigida para o compartimento seguinte onde desempenhará uma dupla função. Arrefece o vapor no circuito e ao mesmo tempo é aquecida e vaporizada. Neste sistema a temperatura diminui gradualmente nos sucessivos compartimentos e o processo termina quando o vapor não tem temperatura suficiente para evaporar a água salina num compartimento [9].

A temperatura máxima de operação neste tipo de destilador é da ordem de 64 -70°C e a capacidade média varia de 2000 a 20000 m³/dia [30].

A redução da temperatura de ebulição da água é importante para a redução dos custos de energia necessários ao processo e para prevenir incrustações nos equipamentos utilizados, pois certos sais dissolvidos em água fria precipitam-se quando a temperatura é elevada, como é o caso de certos carbonatos e sulfatos, não havendo assim, a necessidade de um complexo pré-tratamento da água salgada [21 e 52]. Trata-se duma técnica com baixo consumo elétrico, comparativamente a outras técnicas (MSF ou osmose inversa). O consumo de energia nos sistemas que empregam esse processo varia entre 40 e 60 kWh/m³ de água produzida.

A MED, tal como a MSF, adapta-se a qualquer tipo de fonte de calor e tem uma capacidade para dessalinizar grandes quantidades de água salgada [52]. Uma unidade de capacidade de 10000 m³/dia (116 l/s) requer, aproximadamente, uma área de 11,5 ha [21 e 32].

Os custos dos trabalhos de engenharia civil são baixos devido à área de implantação ser pequena. Os custos de manutenção também são baixos. Opera 24 horas por dia exigindo

pouca supervisão e com grande eficiência térmica o que permite poupar nos custos de combustíveis [52].

A Figura 3.4 é um diagrama desta tecnologia de dessalinização da água.

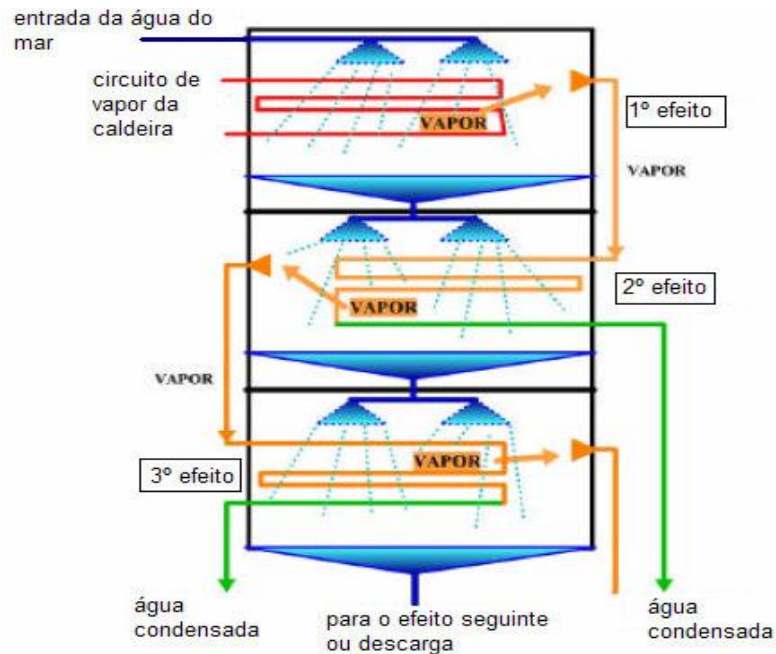


Figura 3.4: Diagrama simplificada da destilação por múltiplo efeito [9].

3.2.1.4. Destilação por compressão de vapor

O princípio de funcionamento da destilação por compressão de vapor, VCD, (*Vapour Compression Distillation*) é semelhante ao do MED com a diferença de que a VCD este tem por base a compressão do vapor de água gerado na evaporação da água a altas pressões [52].

Este método de dessalinização é empregue na produção de água potável em estações de pequena e média escala, como nos hotéis, barcos e pequenas comunidades. A capacidade destas unidades é, em geral, inferior a 100 m³/dia, embora existam algumas que atingem os 3000 m³/dia. O consumo energético varia de 7 a 12 kWh/m³ [9 e 30]

Mesmo nesta técnica há duas formas distintas de operação. Numa, a compressão do vapor pode ser feita por meio de um compressor mecânico (MVC – *Mechanical Vapor Compression*), enquanto na outra, são adicionadas pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um ejetor (TVC – *Thermal Vapor Compression*). A técnica MVC efectua-se, apenas, numa etapa enquanto a TVC necessita de várias etapas no decurso do

processo [52]. Esta diferença advém do fato de que os sistemas mecânicos apresentam o mesmo consumo de potência específica (potência/ unidade de água produzida) independente do número de etapas, enquanto a eficiência de sistema com termo-compressão aumenta com etapas adicionais. Assim a vantagem principal de adicionar efeitos a um sistema com compressor mecânico é simplesmente aumento de sua capacidade [54].

No processo MCD, obtém-se vapor de água através do aquecimento da água salina usando uma fonte de calor designado por evaporador. O vapor gerado é comprimido com um compressor mecânico e encaminhado para o interior do evaporador. Da compressão, a temperatura e a pressão do vapor aumentam. Uma conduta de água salina que alimenta o sistema por se encontrar a uma temperatura mais baixa, condensa o vapor comprimido no permutador de calor e simultaneamente aquece-se originando mais vapor, repetindo o ciclo [9].

A capacidade máxima deste método é limitada pela capacidade do compressor. Por causa do elevado volume de vapor a baixa pressão que terá de ser comprimido é necessário utilizar um compressor de elevada capacidade [9]. O compressor mecânico pode funcionar a diesel ou a electricidade. A temperatura máxima de operação é de 64-70°C. Atualmente é possível encontrar no mercado compressores modernos com uma eficácia até 80% [30 e 52].

O uso da energia eléctrica como fonte de energia principal faz com que esta técnica, VC, seja usada muitas vezes como processo paralelo a outras técnicas de dessalinização. Este funcionamento híbrido permite uma optimização do consumo energético do sistema [52].

Na unidade de compressão de vapor através de um jacto de vapor, também chamado de termo-compressor, um orifício no jacto de vapor cria e extrai vapor de água do recipiente principal, criando uma pressão ambiente mais baixa neste. O jacto de vapor comprime o vapor de água extraído. Esta mistura é condensada nas paredes do tubo para fornecer energia (calor de condensação) para evaporar a água salina que é aplicada no lado externo das paredes do tubo no recipiente [54].

A VC é considerada por alguns autores como sendo o processo de destilação mais eficiente. A capacidade de funcionar com temperaturas baixas possibilita a utilização de materiais metálicos, como o alumínio, pois o ataque da corrosão é reduzido [52].

No entanto, este método de dessalinização encontra-se em vias de se tornar obsoleto [21].

Pode-se ver na Figura 3.5 a representação deste sistema.

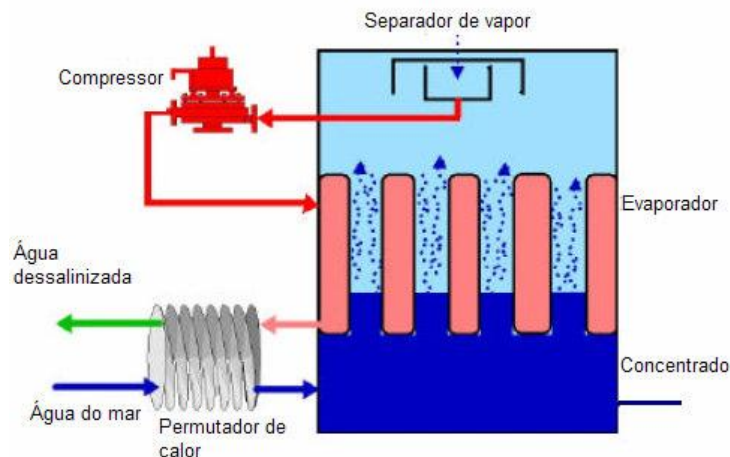


Figura 3.5: Diagrama de destilação por compressão de vapor [9].

3.2.1.5. Dessalinização por congelação em vácuo

A dessalinização da água do mar por congelação é utilizada em regiões frias em que a temperatura é inferior a 0°C. Ao congelar a água do mar a uma temperatura negativa próxima dos -2°C, formam-se cristais de gelo de água doce [30].

Na dessalinização por congelação em vácuo, a água do mar é injectada para o interior de uma câmara de vácuo a uma pressão aproximadamente 0,004 atm. A esta baixa pressão ocorre subitamente uma evaporação parcial da água injectada bem como a perda de calor da água, o que provoca o seu arrefecimento e a formação de cristais de gelo. Os cristais de gelo que flutuam na água salina são lavados com água doce para retirarem os sais adsorvidos e depois fundidos em água dessalinizada. Esta água por ser menos densa que a água do mar é removida facilmente da câmara de lavagem e fusão, como está representada na Figura 3.6 [9].

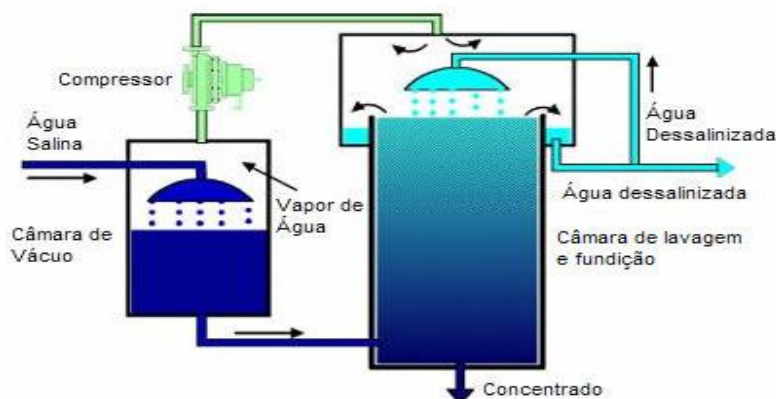


Figura 3.6: Ilustração de um dessalinizador por congelação a vácuo [9].

Este método de dessalinização da água do mar em teoria requer menos energia do que os outros processos de destilação térmica e é menos susceptível a problemas de formação de incrustações que afecta os outros métodos. No entanto, foram construídos poucas plantas de dessalinização por congelação a vácuo [9].

A produção de água doce é de 40 a 50 l/m²dia a uma temperatura de -5°C e de 120 a 160 l/m²dia a -20°C.

À primeira vista pensa-se que a congelação é um processo mais económico que a destilação, mas de facto não o é. Na destilação, uma boa parte da energia necessária para efectuar a evaporação da água é recuperada no calor libertado durante a condensação. Por outro lado, a produção de calor necessário à evaporação é, em geral, menos custosa que a requerida no esfriamento para congelação. No entanto, este último processo apresenta algumas vantagens em relação à destilação: as baixas temperaturas minimizam os problemas de corrosão e a água doce obtida é fresca, mineralizada e bem oxigenada [30].

3.2.1.6. Dessalinização por congelação através de refrigerante secundário

Na dessalinização por congelação através de refrigerante secundário (DCRS) utiliza-se uma substância volátil e de baixa solubilidade na água do mar. Esta substância é comprimida e arrefecida até uma temperatura próxima da temperatura de congelação de água do mar e, misturada com esta. Devido à baixa temperatura e embora a substância refrigerante se evapore, é capaz de arrefecer a água do mar provocando a formação de cristais de gelo. O gás butano é uma das substâncias refrigerantes secundários normalmente empregado. Este método de dessalinização tem uma certa vantagem em relação a VDC por ter um equipamento de menor dimensão para obter água destilada mas a VDC oferece vantagens significativas por possuir uma elevada capacidade de transferência de calor [27].

3.2.1.7. Dessalinização por formação de hidratos de gás ou clatratos

Gases hidratados ou clatratos de gases são agregações cristalinas entre as moléculas de água ligadas por ponte de hidrogénio em redor de uma molécula de gás. Neste método de dessalinização mistura-se a água salina com um gás que irá provocar a formação do clatrato, dentro de um compartimento ou câmara de mistura. O clatrato formado precipita-se,

separando assim da água do mar e com isso facilita a remoção física do precipitado. O clatrato após estar separado é depois aquecido permitindo retirar o gás, obtendo assim uma água desprovida de sólidos ou sais dissolvidos. Este método é praticamente semelhante à de DCRS, sendo que a diferença entre eles, reside na temperatura de formação de clatratos que é maior do que a temperatura de congelação de água do mar, tornando este método menos dispendioso em termos energéticos [27].

3.2.2. Processos de dessalinização por membranas

Com o aparecimento das tecnologias membranares, tornou-se possível o tratar a água sem recorrer a produtos químicos, a custos relativamente baixos. Nos processos por membranas a dessalinização é feita empregando membranas sintéticas semipermeáveis que tem a capacidade de “filtrar” os sais dissolvidos quando se aplica um gradiente de pressão ou uma diferença de potencial eléctrico entre as superfícies das membranas [29].

Comercialmente, as membranas são utilizadas em dois métodos de dessalinização importantes: a electrodialise e a osmose inversa. Ambos os sistemas utilizam a habilidade das membranas diferenciarem e selectivamente separarem os sais da água [30].

3.2.2.1. Dessalinização por electrodialise

A electrodialise (ED) é uma evolução da electrólise. Nesta última, uma determinada quantidade de água salgada é colocada num recipiente onde existem dois pólos alimentados por energia eléctrica. As moléculas de cloreto de sódio dissociam-se em iões, indo os de sódio para o pólo negativo e os de cloro para o pólo positivo. Outros sais também são afectados por este fenómeno. Para além da energia eléctrica, a ED requer o uso de membranas especiais, semi-permeáveis, as quais podem ser catiónicas ou aniónicas. As membranas são colocadas paralela e alternadamente formando vários compartimentos. As catiónicas permitem a passagem apenas de iões positivos, enquanto as aniónicas permitem a passagem de iões negativos. Devido ao campo eléctrico formado entre os dois pólos, situados um no primeiro compartimento e o outro no último, os iões migram para os respectivos pólos, atravessando as membranas ou sendo por elas detidos. Obtêm-se assim compartimentos com água potável

com uma determinada quantidade de sais, bem como compartimentos com águas mais salgadas que a original (salmoura) [30].

A Figura 3.7 é uma simplificação da ED com duas membranas.

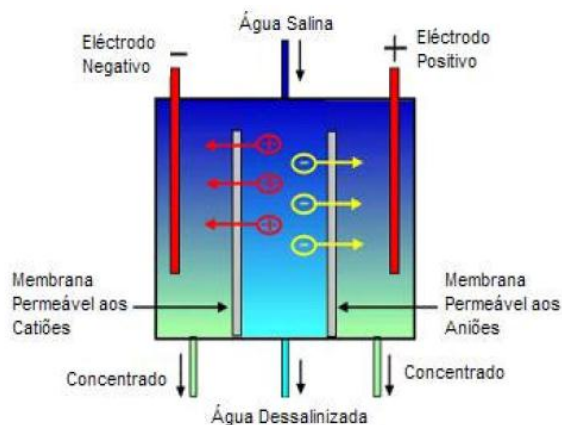


Figura 3.7: Princípio da electrodialise [9].

Por vezes, é necessário proceder a um pré-tratamento antes do processo em questão [72]

Usualmente, as unidades de electrodialise possuem centenas de membranas com uma espessura de 0,5 mm e um espaçamento entre elas de 1 mm, por onde a água circula [30].

O consumo de energia é proporcional à quantidade de sais removidos, sendo o consumo na ordem de 1,5 a 2 kWh/m³ de água tratada.

A ED é responsável por aproximadamente 5% do volume mundial de água dessalinizada no mundo [20].

3.2.2.2. Osmose Inversa ou Reversa

Em relação aos processos térmicos a dessalinização por osmose reversa, ROD, (*Reverse Osmosis Desalination*) é relativamente recente, tendo a sua comercialização iniciado nos anos sessenta [9].

A Osmose reversa, ou osmose Inversa (OI), consiste na passagem forçada da água, com elevada concentração de sais a uma elevada pressão externa, por meio de uma bomba especial, contra uma membrana semipermeável, devidamente projectada para aquela solução.

Trata-se de um processo induzido, obtido por intermédio da aplicação mecânica de uma pressão superior à pressão osmótica, do lado da solução mais concentrada, fazendo com que ocorra um fluxo no sentido da solução de menor concentração salina [20].

A taxa de rejeição de salmoura no final do processo varia entre 20-70% do volume total de água que entra no circuito, consoante a quantidade de sais na água bruta [72].

A Figura 3.8 ilustra de forma simplificada o princípio da osmose inversa.

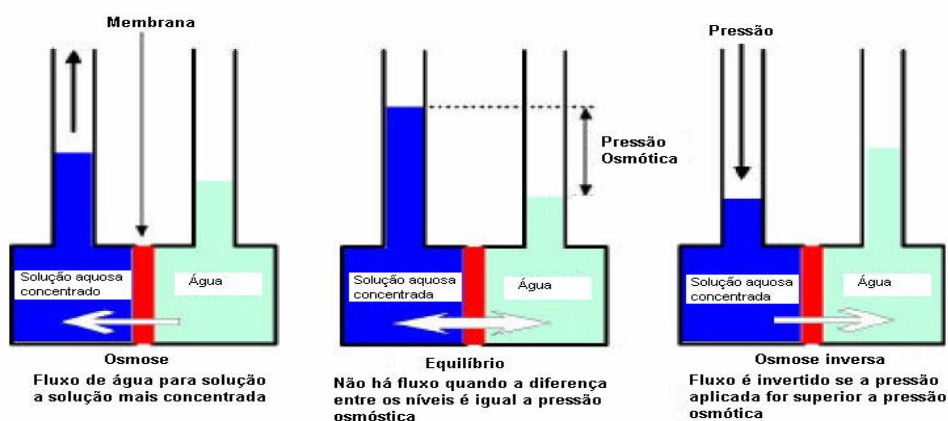


Figura 3.8: Ilustração da osmose inversa [9]

Existem vários tipos de membranas, podendo ser citadas as mais utilizadas: acetato de celulose, poliamidas e polissulfonas [7]. Em geral, a membrana é composta por poros de dimensões atómicas (<10 angstrom – $100 \mu\text{m}$), retendo assim todas as partículas superiores a sua dimensão [30]. Quanto à configuração geométrica, há modelos enrolados em espiral, planas em placas, tubular ou em fibras ocas [20]. A vida útil da membrana é um factor crítico, variando entre 3 e 5 anos. Seu desempenho é afectado, não só pela compactação, mas também por incrustações e entupimentos [21].

Actualmente, em escala mundial, este subprocesso já responde por cerca de 34% dos cerca de 15 milhões de metros cúbicos de água que são dessalinizados por dia [20]. O consumo de energia de um equipamento de médio porte que utiliza o processo de osmose reversa é de cerca de 5 kWh/m^3 de água potável obtida [21].

3.2.3. Sistemas de Dessalinização Híbridos

Um sistema de dessalinização híbrido consiste em uma combinação de dois ou mais processos de dessalinização operando em uma única instalação, permitindo incorporar as melhores

características de todos os processos. O sistema é económico para estações de maior porte, isto é, aquelas com capacidade de 100000 m³/dia ou mais.

Um exemplo de um sistema híbrido seria uma unidade de destilação e osmose inversa, construída como parte de uma estação com duplo propósito (electricidade e dessalinização). A principal vantagem desse sistema seria uma diminuição do custo da água dessalinizada.

3.2.4. Comparação dos processos de dessalinização

Há que ter em conta o aspecto energético, os custos de exploração entre outros aspectos destas tecnologias, uma vez que em situações práticas, pode ser vantajoso a escolha de uma contra a outra.

Como simples referência de suas características pode-se dizer que [42]:

- A destilação:
 - Tem um elevado consumo energético;
 - Requer uma elevada inversão inicial;
 - Precisa de uma extensão de terreno importante;
 - Seu custo de instalação é inferior em relação aos outros processos;
 - Sua eficiência é baixa;
 - Não depende da salinidade da água;
 - Necessita de uma fonte de vapor que segundo os casos pode ou não ser independente do processo;
 - Produz uma água de qualidade quase pura;
 - Pode acoplar-se à uma central eléctrica produtora de energia.
- A osmose inversa:

- Tem o menor consumo energético;
 - Pode-se utilizar tanto em água salobra como em água do mar;
 - A inversão precisa de estar muito ligada as características da água que se pretende dessalinizar e em geral é inferior em relação aos outros sistemas;
 - Precisa de pré-tratamentos físico-químicos que as vezes podem ser importantes;
 - Precisa de uma extensão média do terreno;
 - Necessita de uma fonte externa de energia;
 - Além de iões, separa bactérias e vírus porque também tem aplicações como sistema de desinfecção;
 - A presença de iões específicos limita as suas possibilidades de aplicação eficiente;
 - O seu manejo complica-se em função das características físico-químicas da água.
- A electrodialise:
 - Tem um consumo energético do tipo médio que para águas de salinidade baixa pode ser similar a osmose inversa;
 - Necessita de menores tratamentos químicos do que outros sistemas;
 - Suas necessidades de espaço e inversão são intermédias entre outros sistemas;
 - Seu custo de instalação é superior ao da osmose inversa;
 - Seu custo de manutenção é baixo.
 - A água produzida é de menor qualidade relativamente a das outras tecnologias;
 - Seu consumo de reagentes é menor que nos outros sistemas;
 - Seu manejo é simples em todos os casos.

Os processos de destilação requerem uma troca de estado mesmo que existe uma perda importante de energia, ou seja, necessitam de calor para provocar o câmbio do estado líquido para o vapor, que praticamente é independente da salinidade que a água tem. A osmose

inversa aplica uma pressão para superar a pressão osmótica da água a tratar portanto, quanto maior for a salinidade da água, maior será a sua pressão osmótica a superar. Do mesmo modo, o deslocamento dos iões que compõem a água mediante a aplicação de uma carga eléctrica, no processo de eletrodialise, exigirá uma intensidade de corrente maior a medida que aumenta o número de iões ou a concentração da solução. O segundo e o terceiro método empregam membranas no processo de separação e também efetuam o processo à temperatura ambiente ao contrário da destilação.

Entende-se que a destilação emprega-se unicamente ao nível comercial para dessalinizar a água do mar, a eletrodialise para dessalinizar água salobra e a osmose inversa tanto para água salobra como para água do mar [42]. No entanto, as membranas usadas no processo de osmose inversa têm uma vida útil muito curta e o custo para substituí-las pode chegar a metade do custo total da dessalinização. Por isso, é sugerida que este processo seja usado primeiramente com águas com menos concentração de sais, isto aumentaria a vida útil da membrana [20].

Os processos de destilação necessitam de uma fonte de calor para manter o ciclo térmico e, em simultâneo, um consumo de energia eléctrica para o seu funcionamento hidráulico. Os processos de membrana requerem exclusivamente energia eléctrica [30]. Devido ao consumo de energia todos são processos caros. O processo de destilação consome mais energia do que o processo de osmose inversa e conseguinte possui operação mais cara. O elevado custo de ambos os processos pode ser atenuado através do emprego da energia solar [20].

3.3. Possíveis impactes ambientais

O recurso a tecnologias de dessalinização nem sempre é aceite da melhor forma. Pois, quando um país projecta instalar um mecanismo de dessalinização, é muito frequente surgirem protestos por parte dos ambientalistas e inquietações no que respeita ao meio ambiente. Assim, de forma a minimizar tais preocupações, devem ser tidos em conta três factores importantes: a escolha do local para a instalação da central de dessalinização (relacionado com a aceitação social da solução de dessalinização), o consumo de energia e a eliminação do que é rejeitado [6].

A dessalinização possui alto potencial de impactos ambientais (flora e fauna, temperatura da água, turbidez, teor de oxigénio, concentração de nutrientes na água) e impactes sobre as atividades humanas (natação, pesca, etc.) devido à contaminação do concentrado gerado nos processos de dessalinização, altamente salino e de poder poluente elevado e às descargas de componentes químicos usados. Os produtos químicos resultantes destes processos devem ser tratados antes de serem lançados em qualquer corpo hídrico [20, 21 e 54].

Os métodos de deposição final da salmoura empregados, como a injeção em poços, despejo no solo, lançamento em corpos de águas superficiais, descarga junto a efluentes de esgoto e uso de lagoas de evaporação são preocupantes e, muitas vezes feitos de forma inadequada [54].

Quando despejada ao solo, as propriedades deste são alteradas, principalmente em relação à sua permeabilidade e aeração, afetando sua produtividade. Uma vez absorvido pelo solo, este resíduo pode chegar às fontes de água subterrânea, aumentando ainda mais sua concentração de sais e dureza, e contaminando-as com a alta concentração de reagentes químicos utilizados na fase de pré-tratamento da dessalinização. Portanto, torna-se necessário a introdução de sistemas de tratamento ou reutilização deste concentrado de modo a evitar impactos ambientais, para que a aplicação desta tecnologia de obtenção de água potável permaneça sustentável [31].

A emissão em águas superficiais é o método mais comum de disposição do concentrado da dessalinização, sendo usada para todos os tamanhos de projecto em operação no mundo. Considerando-se o poder de diluição dos oceanos, essa alternativa poderia ser considerada ideal. Porém, o impacto da emissão do concentrado, apesar de produzir pouco efeito no oceano como um todo, tem grande potencial para prejudicar o ecossistema costeiro, sendo necessário considerar a fragilidade de cada ecossistema antes do retorno do rejeito ao mar. Assim, deve-se atentar para que essa emissão seja compatível com as águas receptoras, podendo haver necessidade de diluição.

A injeção da salmoura em sistemas de esgoto pode suscitar uma eventual contaminação e problemas no sistema de tratamento. Em poços, poderá contaminar aquíferos de águas subterráneas devido a vazamentos nos poços. O uso de lagoas de evaporação pode também provocar a contaminação de aquíferos de águas subterráneas devido a vazamentos na lagoa e prejuízos à fauna que é atraída pois, este método faz concentrar também elementos como

selénio, boro e metais pesados em níveis tóxicos. As lagoas de evaporação são as mais apropriadas para um clima relativamente quente, seco, com taxas de evaporação elevadas e baixo custo de terra. O concentrado transforma-se num sólido seco cristalino como resultado de uma secagem completa [54].

Para além disso, destaca-se ainda, o efeito das estações de dessalinização sobre a harmonia paisagística, os incómodos gerados pelo ruído e a poluição e outros riscos relacionados com o uso (emissão de CO₂), transporte e armazenamento de combustíveis [6, 20 e 21].

Pode afirmar-se que a dessalinização e o ambiente não são rivais, mas complementares entre si. A dessalinização pode ser posta em funcionamento numa simbiose com o meio ambiente com o objectivo de servir o homem e o ambiente [6].

3.4. Custos associados à dessalinização da água do mar

Um grande entrave à aplicação da dessalinização é o seu elevado custo [15].

Os custos de produção de água doce por dessalinização são influenciados por diversos fatores, nomeadamente: custos de instalação e operação, tratamento químico, custos de energia e manutenção [46].

Os custos associados às estações dessalinizadoras são muito elevados pelas seguintes razões, entre outras [10]:

- Agressividade da água salgada, que corrói tubulações e equipamentos, exigindo, por exemplo, que todos os tubos, bombas e reservatórios sejam construídos em aço inoxidável ou em plásticos resistentes ao sal;
- Elevada alcalinidade da água salgada, que provoca o entupimento, pela formação de placas salinas, de tubulações e válvulas;
- Elevado consumo de energia para destilar a água;
- Custo elevado dos sais necessários ao reequilíbrio da salinidade da água destilada;
- Estágio tecnológico dos processos de dessalinização e de reequilíbrio da salinidade da água;

- Complexidade operacional, que exige, para as grandes unidades, pessoal especializado e laboratórios sofisticados de controlo operacional.
- Dimensão da Central Dessalinizadora: Quanto menor é a capacidade instalada maior o custo.

Posto que o custo da energia é o maior componente do custo de operação de uma planta de dessalinização, o desenvolvimento de um método sustentável de dessalinização exige a minimização do consumo de energia e, igualmente, o uso de fontes de energia renováveis que possam permitir que países menos desenvolvidos tenham acesso a quantidades suficientes de água tratada. Diferentes opções utilizando energias alternativas podem ser sugeridas; no entanto, os sistemas baseados na energia solar estão entre as opções mais realísticas [46 e 52].

4. METODOLOGIA

Para se atingir os objectivos propostos neste estudo, as seguintes etapas foram cumpridas:

- Caracterização da área de estudo e da situação dos recursos hídricos disponíveis na zona.

Para isso, foram levantados dados disponibilizados por diversos órgãos públicos que se relacionam com o assunto, tais como: a Câmara Municipal, a empresa responsável pela produção e distribuição da água potável (ELECTRA), ao Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), ao Instituto Nacional de Estatísticas (INE), ao Instituto Nacional de Desenvolvimento das Pescas (INDP), entre outros. Além desses dados, informações publicadas em trabalhos científicos foram retiradas para complementar a caracterização da área focada por este estudo. Informações tais como aspectos físicos e socioeconómicos da área, a disponibilidade de recursos hídricos, entre outras, foram analisadas no contexto do objectivo proposto. Para detalhar a questão sobre a disponibilidade, consumo e possíveis acções de poupança dos recursos hídricos, fez-se um inquérito a algumas famílias da zona.

- Selecção do processo tecnológico a trabalhar, com considerações sobre a análise térmica, composição, classificação e ainda, as vantagens e desvantagens da sua aplicação.

Para a selecção do processo tecnológico, vários aspectos foram levados em conta, de acordo com a sua adequação para a aplicação pretendida nesse estudo, para a qual um sistema de dessalinização de pequena escala seria desejável. Esses aspectos serão listados e discutidos mais adiante, justificando a escolha da destilação solar como o processo tecnológico escolhido.

- Descrição detalhada do dispositivo de dessalinização proposto.

A configuração do sistema foi conseguida através da observação de vários protótipos divulgados sobre o assunto, em artigos técnicos e científicos publicados relacionados com a temática desse estudo.

A selecção dos materiais fez-se tendo em consideração aspectos relacionados com as suas propriedades físicas intrínsecas para os processos de transmissão de calor e também da sua susceptibilidade à corrosão.

- Modelação matemática

Simulação do modelo de um sistema capaz de satisfazer os objectivos do trabalho considerando as características do local em estudo.

Para o projecto do dispositivo de dessalinização proposto, foram utilizados índices de radiação solar medidos na Estação Meteorológica Automática do Mindelo e facultados pelo INMG. Esses dados consistiam na radiação global em superfície horizontal e, desta forma, foi necessário calcular a radiação global em superfície inclinada sendo a usada no modelo numérico.

4.1. Caracterização da área de estudo

4.1.1. Localização geográfica

A área de estudo escolhida para aplicar o processo de dessalinização da água do mar utilizando a energia solar, a fim de resolver os problemas com a escassez de água potável, foi a vila piscatória de Salamansa. Esta vila situa-se no Norte da ilha de São Vicente que tem uma superfície de 227 km² e está localizada no grupo do Barlavento, a noroeste do arquipélago, entre os paralelos 16° 46' e 16° 55' de latitude N e os meridianos 24° 51' e 25° 05', de longitude W [17 e 40].

A figura 4.1 mostra o local de estudo relativamente à ilha onde se situa.



Figura 4.1: Localização do local de estudo - Vila de Salamansa (em cima) [25 e 72]; Ilha de São Vicente (em baixo) [26]

De acordo com dados históricos, a ilha de S.Vicente foi das últimas a ser povoada devido à fraca capacidade agrícola, condicionada pelas reduzidas disponibilidades hídricas [40]. Para além de Salamansa, a ilha tem ainda as seguintes localidades: a cidade do Mindelo, Lameirão, Ribeira Julião, Ribeira da Vinha, Ribeira de Calhau e São Pedro. Salamansa é uma comunidade piscatória, que se encontra situada a uma distância de cerca de 17 Km da cidade do Mindelo, capital da ilha [41].

4.1.2. Caracterização física

A seca e a aridez são predominantes, com excepção nas regiões dos talwegues, o que permite sazonalmente alguma exploração agrícola de subsistência [24].

Os ventos dominantes durante o ano são os alísios que sopram na direcção NE. São em geral ventos constantes, ainda que com rajadas de grande intensidade [40].

| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1996 | 27,9 | 31,6 | 27,3 | 34,6 | 33,7 | 32,6 | 23,5 | 22,7 | 13,4 | 27,6 | 25,6 | 18,0 |
| 1997 | 17,2 | 22,6 | 22,3 | 20,7 | 28,8 | 30,4 | 21,2 | 20,2 | 20,0 | 23,7 | 24,5 | 19,2 |
| 1998 | 19,2 | 21,8 | 24,3 | 25,2 | 23,5 | 24,1 | 19,5 | 17,3 | 19,8 | 19,6 | 17,8 | 22,2 |
| 1999 | 19,8 | 19,5 | 24,4 | 20,6 | 17,6 | 17,0 | 15,8 | 18,4 | 10,3 | 21,1 | 16,9 | 21,1 |
| 2000 | 23,8 | 22,6 | 16,8 | 26,7 | 23,0 | 15,4 | 13,7 | 30,3 | 12,6 | 14,8 | 10,7 | 13,3 |
| 2001 | 22,0 | 21,0 | 26,0 | 24,0 | 21,2 | 17,0 | 14,8 | 13,5 | 12,4 | 12,9 | 23,0 | 17,0 |
| 2002 | 16,4 | 18,9 | 22,8 | 19,5 | 12,9 | 18,5 | 13,5 | 11,4 | 10,6 | 10,1 | 12,4 | 5,7 |
| 2003 | 17,7 | 24,5 | 13,7 | 13,8 | 14,9 | 12,9 | 13,1 | 10,9 | 9,6 | 9,2 | 18,7 | 18,9 |
| 2004 | 29,6 | 19,2 | 25,7 | 29,5 | 21,2 | 22,7 | 17,6 | 18,7 | 15,1 | 20,6 | 14,9 | 20,3 |
| 2005 | 16,6 | 23,9 | 20,0 | 27,0 | 24,1 | 22,4 | 20,0 | 22,2 | 18,6 | 19,6 | 17,8 | 18,6 |
| 2006 | 20,7 | 25,4 | 27,3 | 29,0 | 28,2 | 27,5 | 20,8 | 16,3 | 15,4 | 19,4 | 15,8 | 22,4 |
| 2007 | 20,3 | 27,3 | 30,7 | 24,8 | 25,3 | 24,1 | 19,3 | 22,0 | 23,4 | 23,6 | 21,2 | 24,0 |
| 2008 | 20,8 | 19,7 | 21,4 | 24,4 | 24,7 | 20,2 | 15,2 | 15,2 | 17,4 | 22,2 | 16,4 | 20,4 |
| 2009 | 24,4 | 30,7 | 23,5 | 23,5 | 24,1 | 22,8 | 13,5 | 12,4 | 11,1 | 13,3 | 14,4 | 10,9 |
| 2010 | 14,9 | 11,9 | 20,6 | 18,5 | 27,9 | 23,0 | 20,1 | 16,8 | 17,6 | 19,5 | 16,0 | 15,5 |
| 2011 | 19,9 | 27,7 | 27,6 | 23,1 | 24,2 | 22,0 | 23,0 | 20,0 | 22,0 | 18,0 | 23,0 | 24,0 |

Tabela 4.1: Velocidade do vento (média mensal e anual em km/h) da Zona de Salamansa – 1996-2011 [50].

A intensidade do vento na área de estudo mantém-se mais ou menos constante ao longo do ano, situando a velocidade média entre 6-35 Km/h. O alísio NE sopra com maior frequência entre os meses de Outubro e Junho, especialmente de Março a Junho. No mês de Julho, regista-se uma mudança de rumo importante, adquirindo mais importância as componentes Este e Sudeste, e já em agosto e Setembro observam-se ocasionalmente ventos de SE e SW, que são precisamente os que trazem as chuvas. A partir de Setembro, registam-se alguns períodos calmos, mais frequentes nos meses de Novembro e Dezembro [50].

Em S. Vicente registam-se precipitações ligeiramente superiores a 100 mm, mas ainda permanece muito seca. Nas últimas décadas, o clima tem sido caracterizado por um aumento da aridez, incluindo a diminuição da frequência e volume total de precipitação [37].

| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|------|------|-----|------|-----|-----|------|-------|-------|-------|------|-----|
| 1996 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 1997 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 1998 | 0,0 | 0,0 | 5,9 | 11,2 | 0,0 | 0,0 | 34,0 | 9,9 | 102,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 1999 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,8 | 70,2 | 53,9 | 0,0 | 0,0 |
| 2000 | 62,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 21,6 | 63,1 | 21,3 | 0,0 |
| 2001 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 58,4 | 10,9 | 57,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2002 | 17,2 | 8,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,2 | 35,1 | 41,2 | 0,0 | 0,0 |
| 2003 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,9 | 5,0 | 126,2 | 24,1 | 0,0 | 1,6 |
| 2004 | 10,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,1 | 74,2 | 56,4 | 0,0 | 97,3 | 3,5 |
| 2005 | 44,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 24,8 | 9,0 | 5,1 | 13,2 | 1,6 |
| 2006 | 1,5 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,5 | 15,0 | 24,8 | 1,4 | 0,0 | 0,0 |
| 2007 | 0,0 | 12,9 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 5,6 | 29,0 | 3,2 | 0,3 | 2,9 |
| 2008 | 2,4 | 2,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,7 | 108,5 | 36,7 | 13,3 | 0,9 | 4,4 |
| 2009 | 0,4 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 56,2 | 179,2 | 39,2 | 0,0 | 5,1 |
| 2010 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 33,5 | 171,5 | 92,9 | 0,5 | 3,2 |
| 2011 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 2,6 | 2,4 | 84,8 | 6,8 | 164,4 | 0,0 | /// |

Tabela 4.2: Precipitação total (mm) em Salamansa– mensal e anual 1996-2011 [50].

Como se pode verificar na Tabela 4.2, de Agosto à Outubro foi o período em que os valores de precipitação e a frequência de pluviosidade foram maiores. No mês de Julho também houve uma boa frequência de pluviosidade embora de fraca intensidade.

No que diz respeito à insolação, o número médio de horas de sol por mês de 1996-2011 é maior na primavera (Março a Junho), e menor nos restantes meses sendo que neste particular os menores valores correspondem aos meses de Fevereiro, Setembro e Dezembro. Este fenómeno está directamente relacionado com o nível de nebulosidade, e incide directamente nos valores da evaporação, evapotranspiração e no regime da seca [40].

| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1996 | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// |
| 1997 | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// |
| 1998 | /// | /// | /// | /// | /// | 257,2 | 240,2 | 207,7 | 203,0 | 238,3 | 205,6 | 187,6 |
| 1999 | 207,0 | 225,0 | 256,5 | 89,7 | /// | /// | /// | /// | /// | /// | 112,0 | 155,6 |
| 2000 | 201,6 | 87,5 | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// |
| 2001 | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | /// | 196,7 | 210,4 |
| 2002 | 250,0 | 170,1 | 204,1 | 251,8 | 232,9 | 198,6 | 209,5 | 207,1 | 193,4 | 210,7 | 193,3 | 245,8 |
| 2003 | 160,7 | 176,4 | 242,6 | 252,3 | 273,2 | 249,7 | 209,3 | 190,8 | 225,1 | 177,4 | 198,7 | 184,7 |
| 2004 | 176,6 | 235,0 | 240,9 | 257,2 | 307,2 | 260,7 | 199,5 | 249,5 | 210,8 | 245,4 | 225,2 | 155,8 |
| 2005 | 199,7 | 202,5 | 311,7 | 264,5 | 253,4 | 249,1 | 237,0 | 234,7 | 194,8 | 250,1 | 193,9 | 193,7 |
| 2006 | 196,8 | 230,8 | 275,9 | 312,7 | 321,2 | 273,7 | 262,6 | 239,3 | /// | 130,9 | /// | /// |
| 2007 | /// | /// | 265,7 | 298,4 | 308,0 | 258,5 | 225,7 | 216,6 | 184,7 | 244,1 | 253,8 | 200,3 |
| 2008 | 189,4 | 207,4 | 270,6 | 294,1 | 310,6 | 236,0 | 218,0 | 204,4 | 241,0 | 188,1 | 223,6 | 148,1 |
| 2009 | 211,7 | 224,3 | 275,3 | 282,2 | 273,8 | 249,4 | 244,8 | 121,6 | 172,2 | 225,1 | 237,8 | 196,9 |
| 2010 | 274,9 | 278,8 | 271,9 | 279,5 | 279,9 | 235,0 | 195,4 | 212,3 | 186,1 | 247,0 | 216,3 | 241,6 |
| 2011 | 260,3 | 218,1 | 296,4 | 288,1 | 303,4 | 250,8 | 210,9 | 229,3 | 205,8 | 199,1 | 266,1 | 165,7 |

Tabela 4.3: Insolação total (em horas) em Salamansa de 1996-2011 [50]

Como se pode verificar na Tabela 4.3, há meses ou anos inteiros em que não se apresenta dados de insolação e isto deve-se a dois factos: ou não havia equipamentos para recolher os dados ou o sistema estaria com problemas de funcionamento [50].

A temperatura média do ar de 1996-2011 foi de 24,3°C e acusa maiores valores de Julho a Outubro que constitui o período da estação de chuvas como referido anteriormente.

| Ano | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1996 | 24,0 | 22,4 | 22,4 | 22,3 | 24,0 | 24,8 | 25,3 | 26,4 | 25,8 | 26,0 | 25,0 | 23,6 |
| 1997 | 22,7 | 22,9 | 23,2 | 23,4 | 23,7 | 24,6 | 25,1 | 26,1 | 26,3 | 26,0 | 25,2 | 23,2 |
| 1998 | 22,3 | 23,4 | 23,9 | 22,7 | 23,3 | 24,3 | 25,4 | 26,3 | 25,3 | 26,6 | 25,5 | 23,2 |
| 1999 | 21,3 | 20,7 | 20,8 | 21,7 | 21,7 | 24,0 | 24,8 | 26,2 | 26,0 | 26,7 | 24,6 | 23,2 |
| 2000 | 21,4 | 21,4 | 22,2 | 22,3 | 22,6 | 23,8 | 24,3 | 26,2 | 26,2 | 24,7 | 23,9 | 22,7 |
| 2001 | 22,6 | 21,7 | 22,4 | 22,1 | 22,5 | 23,7 | 24,4 | 27,4 | 28,3 | 26,8 | 25,4 | 23,8 |
| 2002 | 23,0 | 21,8 | 21,8 | 22,6 | 24,0 | 23,3 | 23,6 | 25,1 | 26,4 | 26,2 | 22,3 | 23,5 |
| 2003 | 22,0 | 21,1 | 21,6 | 22,3 | 23,3 | 24,1 | 25,3 | 26,8 | 27,2 | 26,6 | 25,0 | 23,5 |
| 2004 | 22,4 | 22,5 | 22,6 | 22,5 | 23,2 | 24,4 | 25,7 | 26,9 | 27,1 | 26,9 | 25,6 | 24,0 |
| 2005 | 22,3 | 21,2 | 22,6 | 23,3 | 24,5 | 25,0 | 26,2 | 26,8 | 27,6 | 27,1 | 25,6 | 24,7 |
| 2006 | 22,3 | 22,0 | 22,4 | 22,8 | 23,4 | 24,4 | 25,7 | 27,0 | 27,9 | 27,4 | 27,0 | 24,2 |
| 2007 | 23,1 | 22,3 | 22,1 | 22,6 | 23,8 | 24,2 | 25,3 | 26,2 | 26,6 | 25,9 | 25,1 | 22,9 |
| 2008 | 22,0 | 22,1 | 22,4 | 23,2 | 23,9 | 24,4 | 25,4 | 27,2 | 27,4 | 26,5 | 25,0 | 22,8 |
| 2009 | 21,4 | 22,4 | 21,6 | 22,1 | 22,8 | 24,1 | 26,3 | 27,5 | 27,2 | 26,9 | 25,6 | 24,4 |
| 2010 | 23,7 | 24,0 | 24,2 | 24,9 | 24,9 | 25,0 | 26,3 | 27,4 | 27,8 | 27,1 | 26,2 | 25,2 |
| 2011 | 23,7 | 22,6 | 22,4 | 23,0 | 24,1 | 24,8 | 25,5 | 26,7 | 27,1 | 26,7 | 24,8 | 23,6 |

Tabela 4.4: Temperatura do ar (°C) em Salamansa – Média mensal e anual 1996-2011 [50].

A caracterização da radiação solar da zona em estudo será feita através de dados referentes à Cidade do Mindelo fornecidos pelo INMG.

Desde Janeiro de 2010 a Janeiro de 2012, a média da radiação total diária na área de estudo é igual a $21,2 \text{ MJ/m}^2$ e a média da radiação máxima diária é igual a $1016,9 \text{ W/m}^2$, o que se traduz num ambiente bastante favorável para aproveitamento deste recurso energético [50].

4.1.3. Caracterização Socioeconómica

A ilha de São Vicente é a segunda ilha mais populosa com 15,5% da população de Cabo Verde [33]. Em 2000 a população de S. Vicente era de 67163 habitantes e em 2010 a população aumentou para 76140 habitantes sendo a taxa de crescimento médio anual (TCMA) de 2000-2010 de 1,3% [38 e 39]. A população de S. Vicente é quase exclusivamente urbana, concentrando-se, sobretudo na cidade do Mindelo.

O principal atractivo que motiva a migração para a ilha de S. Vicente é o emprego com realce para os sectores do comércio, portuário e turismo [40].

Segundo o INE, a zona de Salamansa conta com uma população de aproximadamente 1174 habitantes (226 agregados familiares) e com uma densidade populacional que gira em torno de 33 habitante por km^2 [17 e 41].

Quanto à actividade económica, destes 1174 habitantes, 764 fazem parte do grupo da população inativa, 361 constituem a população activa ocupada e os restantes 49 compõem a população desempregada. Em relação ao nível de escolaridade, a maioria dos habitantes frequenta ou frequentou o ensino básico [17].

É uma zona rural que se dedica essencialmente à pesca, onde mais de metade da população vive dos rendimentos provenientes dessa actividade. Essa actividade é complementada com outras actividades designadamente criação de animais, agricultura (nas épocas de chuva) e o comércio.

Esta zona possui cerca de 148 pescadores, sendo 131 em regime exclusivo e 17 em regime *part-time*. E conta com cerca de 28 botes, sendo 27 motorizados e tem cerca de 10 vendedeiras de peixe. Praticam essencialmente a pesca à linha dirigida a espécies demersais (garoupa, moreia, goraz, bentelha, bica, etc.) e grandes pelágicos (albacora gaiado, patuto,

ilhéu ou serra merma e judeu). Também praticam a pesca de mergulho feita em apneia por cerca de 15 mergulhadores dirigida à lagostas, polvos, búzios, lapas, percebes, etc. A prática da pesca de mergulho é limitada pela falta de recursos financeiros para aquisição de equipamentos de mergulho. Os pescadores da comunidade da Salamansa têm consciência de que os recursos estão a diminuir ao longo do tempo, mas segundo eles, a pesca feita em Santa Luzia, serve para sustentar quase toda a população de Salamansa [41].

Na Zona de Salamansa não existe uma rede de esgotos por isso a evacuação das águas residuais é feita maioritariamente na Natureza (mar, ar livre, céu aberto). Quanto aos resíduos sólidos a sua maioria é evacuada e recolhida por um camião de lixo [17].

4.1.4. Produção e abastecimento de água

Em São Vicente, a água destinada a consumo humano é produzida na central de dessalinização da Electa S.A, localizada na Mاتيota dentro do tecido urbano do Mindelo, recebendo água do mar captada junto à praia da Laginha [51].

Na ilha 67,5% da população abastece-se através de água canalizada (54,6% na própria casa e 12,9% em casa dos vizinhos), 18,7% através de chafarizes, 11,4% através de autotanques e 2,4% através de outras fontes (poços, etc.). O consumo unitário de água potável, de acordo com dados da Electra, atingiu em média 23 l/dia/habitante. Apenas 56,8% dos agregados familiares vivem em alojamentos com ligação a rede pública de abastecimento de água [37].

A Central Dessalinizadora de São Vicente está equipada com quatro unidades de osmose inversa cuja capacidade total é de 4200 m³/dia [40].

A ilha de São Vicente possui uma rede de água com cerca de 122 km e a capacidade total de armazenamento é de 12175 m³ e a rede de água não é alimentada continuamente [40].

De acordo com o INE, em Salamansa 80% da população (181 agregados familiares) abastece-se através de chafarizes e os restantes 20% (45 agregados familiares) através de autotanques. Desta forma, pode-se afirmar que 20% da população desta zona abastece-se de forma mais ou menos precária (por autotanques).

Salamansa está fora do contrato de concepção da ELECTRA e, deste modo, esta empresa não é forçada a abastecer a localidade em causa. É da responsabilidade da Câmara Municipal da

ilha levar a água potável da central dessalinizadora do Mindelo a Salamansa que é transportada em camiões de água e depositada num chafariz localizado no centro da zona. O transporte da água é feito pelos “Bombeiros de São Vicente” e a água depois de depositada é vendida aos habitantes da zona. Processa-se desta forma pois não há uma rede de distribuição de água no local que possibilite o acesso mais rápido e menos trabalhoso aos habitantes de Salamansa [86].

Para além do chafariz de água doce, existe um chafariz de água salobra e os dois constituem os principais pontos de abastecimento de água na zona.



Figura 4.2: Chafariz de água doce (à esquerda) e chafariz de água salobra (à direita) [72].

Ainda nesta secção são apresentados dados recolhidos através do inquérito e/ou entrevistas semi-estruturadas efectuados à 10 famílias na zona em estudo. Os pontos abordados foram:

- Nº do agregado familiar;
- Ponto de abastecimento de água;
- O consumo diário de água;
- Acções de poupança de água;
- Disponibilidade de electricidade nas casas.

A Tabela 4.5 apresenta, de forma sintetizada, os resultados do questionário feito às famílias representantes da população local.

| Família | Nº agregado | Abastecimento | Consumo (l/dia) | Acções poupança | Eletricidade |
|---------|-------------|---------------|-----------------|---|--------------|
| 1 | 5 | A+B | 150s + 25d | Água doce só para cozinhar e beber | Sim |
| 2 | 5 | A+B | 125s + 25d | Água doce só para cozinhar e beber | Sim |
| 3 | 5 | A+B | 25s + 25d | Reserva de água | Sim |
| 4 | 4 | A+C | 25s + 25d | Reserva de água | Sim |
| 5 | 3 | A+B | 250s + 25d | Reserva de água | Sim |
| 6 | 3 | A+C | 25s + 25d | Recorre-se aos chafarizes | Sim |
| 7 | 5 | A+B | 125s + 50d | Recorre-se à Ribeira Amargosa | Não |
| 8 | 4 | A+B | 100s + 50d | Recorre-se à Ribeira Amargosa | Sim |
| 9 | 9 | A+C | 125s + 125d | Recorre-se à Ribeira Amargosa | Sim |
| 10 | 11 | A+C | 235s + 200d | Recorre-se à Nascente; reutiliza-se água do banho para rega | Sim |

Tabela 4.5: Resultados do inquérito e/ou entrevistas feitos no local de estudo, em que A - Chafariz de água doce, B - Chafariz de água salobra, C - Armazenamento de água salobra em tanque caseiro através de viaturas auto-tanques.

Por esses resultados constatou-se que, 80% dos inqueridos são agregados familiares constituídos por 3 a 6 membros, com uma predominância de 5 pessoas por agregado e também se verifica que 20% são agregados compostos por 7 a 11 pessoas.

Relativamente às questões colocadas sobre o fornecimento de energia eléctrica, verificou-se que a maioria dos entrevistados possui fornecimento de energia eléctrica (90%), no entanto, com frequentes cortes.

Através do inquérito e/ou entrevistas, também foi possível fazer uma estimativa do caudal médio de água doce necessário para abastecer toda a população da zona. Sabendo que esta é de 1174 habitantes e por dia a quantidade média de água por pessoa é de 9,25 litros, o caudal diário e anual estimado para zona são respectivamente cerca de 10,86 m³ e 3963 m³.

Nas zonas onde há redes de água canalizada as famílias pagam cerca de 359,98 ECV (equivalente a 3,27€) por cada tonelada de água doce. Através de entrevistas feitas à alguns moradores de Salamansa soube-se que o custo de 20 e 25 litros de água doce corresponde a 12 e 15 ECV respectivamente (1 litro equivale a 1,67 ECV). As tarifas praticadas em Salamansa revelam muita iniquidade. O preço da água nos chafarizes e auto-tanques, para o consumo doméstico e destinada às famílias da zona que não possuem ligações domiciliaries, é superior às tarifas das ligações domiciliaries que é aplicada em qualquer zona da cidade do Mindelo. Os preços são potencialmente inoportáveis para muitas famílias, que acabam por comprar 1 tonelada de água a 600ECV (5,46€) sendo um valor muito aquém daquele que é aplicado noutras zonas. Desta forma, muitas famílias são obrigadas a restringir o consumo de água

doce ou generalizar o uso da água salobra (beber, cozinhar) que é menos dispendiosa em relação à água doce (1 tonelada equivale a 320 ECV ou 2,90€).

Para além dos chafarizes algumas famílias recorrem à Ribeira Amargosa que fica a uma distância de 10 minutos a pé da zona. Segundo a Electra S.A., nesta ribeira, assim como em qualquer outra em São Vicente, é inviável implementar um furo de exploração devido às secas cíclicas e a durabilidade do projecto (não há garantia de exploração). Por outro lado, a água encontrada na referida ribeira é de má qualidade e assim, imprópria para consumo.

Identifica-se desta forma, a necessidade da procura de soluções imediatas. Torna-se inevitável o recurso a outras formas de mobilização de água e, é nessa perspectiva que é pertinente considerar a construção de uma unidade de produção de água dessalinizada. O projecto da dessalinizadora desempenhará um papel extremamente importante na resolução do problema da disponibilidade de água em Salamansa, pois permitirá melhorar as condições de acesso, contribuindo assim para a melhoria das condições sanitárias e de saúde pública da zona.

4.2. Seleccção do processo tecnológico

Durante o estágio de projecto, um processo tecnológico apropriado para uma aplicação particular teve de ser seleccionado. Há um conjunto de vantagens que conduziram à escolha da destilação solar como o processo tecnológico mais adequado para a aplicação pretendida nesse estudo, no qual um sistema de dessalinização em pequena escala é desejável. Essas vantagens podem ser observadas mais à frente.

4.2.1. Destilação solar – a tecnologia de dessalinização proposta

As tecnologias de evaporação começaram a ser utilizadas em regiões completamente isoladas, sem outro tipo de recursos que não fosse o mar ou naquelas que dispõem de enormes quantidades de recursos energéticos, dado que para dessalinizar a água é necessário a utilização de energia de uma ou outra forma [42].

A primeira instalação de um destilador solar moderno foi desenvolvida em 1872 em Las Salinas (Chile) pelo engenheiro sueco Charles Wilson, para fornecer água potável aos animais. A unidade de destilação construída no Chile era constituída por 64 tanques de água (num total de 4459 m²) contendo água salgada que absorvia a radiação solar levando a água

ao estado de vapor, a qual, era de seguida condensada sobre a superfície interior de uma cobertura inclinada transparente, sendo depois colectada e recolhida em tanques para posterior armazenamento [53].

Desde então, diversas unidades de destilação solar foram construídas e estudadas, utilizando o mesmo conceito, embora variando a geometria, materiais, métodos de construção e de operação. Este princípio (destilação solar) é uma transposição, em menor escala, do ciclo hidrológico da água, no qual a água da superfície terrestre se evapora sob a acção da radiação solar transformando-se em vapor de água, o qual, depois de acumulado se condensa em contacto com camadas frias, dando origem à chuva [35].

Devido a limitações de custo e área, em sua maioria o uso de destiladores solares é ainda experimental, não tendo atingido um patamar comercialmente importante, apenas com aplicações de pequena escala. É estimado que existam cerca de apenas cem destiladores solares espalhados em cerca de vinte e cinco países, com capacidade instalada de menos de vinte mil litros por dia. Este número não inclui os pequenos destiladores, usados apenas para uso familiar [45].

Como se sabe, a água, quando aquecida, a 100°C à pressão atmosférica, passa ao estado de vapor, absorvendo cerca de 540 kcal/g. Supondo ter à disposição água a 20°C, é preciso fornecer-lhe ainda 80 kcal/g para aquecê-la até 100°C. Para transformar em vapor 1 litro de água, inicialmente a 20°C, é necessário fornecer cerca de 620 kcal/kg. A água evapora também a uma temperatura inferior a 100°C, mas em tal caso, o calor latente de vaporização é maior. Por exemplo, a temperatura de 20°C, o calor latente de vaporização é de quase 585 kcal/kg contra cerca de 540 kcal/kg a 100°C. Às temperaturas ordinárias, a quantidade de calor que se deve fornecer à água para evapora-la varia entre 600 e 620 kcal/kg. Os destiladores solares têm a vantagem de que seu produto, a água doce, é tanto mais exigido quanto maior é a insolação, sendo portanto maior sua produção. A energia solar, à medida que chega ao destilador, provoca a evaporação da água, e tal evaporação continua mesmo depois do ocaso, até que haja diferença de temperatura entre a água salgada e a área circunstante, que se esfria ao pôr-do-sol, com vantagem para a produtividade da instalação [34].

A destilação solar, que é feita via destilador solar do tipo tanque raso (*basin type*), é uma tecnologia muito simples que se processa da seguinte forma: a radiação solar aquece a água contida num tanque (de material específico) construído ou não com material escuro (a fim de reter calor). A água vaporiza-se e o vapor condensa-se na cobertura de vidro (que tem uma temperatura mais baixa) e a lâmina de água destilada é então colectada nas calhas de recolha

localizadas na extremidade inferior da cobertura do destilador. A energia solar é aprisionada dentro do equipamento devido ao vidro ter transparência alta. Quando a água evapora, as impurezas com menor poder de evaporação ficam retidas no fundo do equipamento. O sal necessitaria de uma temperatura de 1400°C para evaporar [36 e 45].

A radiação solar, directa e difusa, ao chegar à cobertura sofre os efeitos de reflexão, absorção e transmissão. Depois de reflectida e absorvida na cobertura, a radiação solar, que é transmitida através do meio transparente, sofre reflexão na superfície da água, absorção na camada de água e, reflexão e absorção no fundo do tanque. Consequentemente, a água contida no tanque é aquecida e evaporada em condições de saturação no interior da unidade. Nem toda a energia reflectida pela água é perdida, já que uma porção desta é novamente reflectida pela superfície interior da cobertura. Uma fracção da energia solar absorvida pela cobertura é emitida para a água provocando, juntamente, com a energia reflectida o efeito de estufa, o qual, possibilita que o aquecimento da água seja feito até uma temperatura superior à da cobertura. O tanque de água troca calor com a cobertura através dos processos de transferência de calor por radiação, convecção natural e transferência simultânea de calor e massa por evaporação. Existe também perda de calor da água para o ambiente através de condução pela base e pelos lados do tanque. A quantidade de calor que chega à cobertura, proveniente da água, juntamente com a porção de energia solar que é absorvida pela cobertura é, então, dissipada para a atmosfera por convecção e radiação.

Para maximizar a quantidade de água condensada, os processos de transferência de calor da superfície da cobertura para atmosfera e da água do tanque para a cobertura, devem estar otimizados. A variação destes processos de transferência de calor depende de vários parâmetros atmosféricos, como a variação da intensidade de radiação e a variação da temperatura ao longo de um dia, da latitude e da longitude do lugar onde a unidade se encontra montada, da velocidade do vento e dos parâmetros da própria unidade, como a espessura da cobertura, orientação e inclinação, profundidade do tanque e das propriedades dos materiais usados na unidade [35 e 53].

O destilador deve ser posicionado com sentido Norte-Sul, para aproveitar o máximo de radiação solar diária. O tamanho mais típico de destiladores para pequenas comunidades é de 0,5 a 2,50 metros de largura por comprimentos de até 100 metros. A melhor profundidade da água deve estar entre 1,5 e 2,5 cm [36 e 45].

Para que o destilador possa funcionar satisfatoriamente, deve-se resolver vários problemas. O fundo do tanque deve estar termicamente isolado, para evitar dispersão do calor para baixo [34].

O nível da água no tanque deve ser mantido dentro dos limites adequados para que a produção de destilado seja otimizada e o material da cobertura deverá estar sempre limpo para uma correcta transmissão da radiação solar [34 e 35].

O destilador deve ser limpo regularmente para a retirada do sal acumulado no fundo do reservatório pois uma maior salinidade da água diminui a produção. A limpeza regular é também importante para evitar a formação de algas [34, 35 e 45].

A medida que a distância entre o vidro e a água aumenta, as perdas térmicas por convecção também aumentam e a eficiência do destilador diminui. O ângulo de inclinação da cobertura de vidro tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. Quanto mais ortogonal à superfície do vidro for esse ângulo de incidência melhor [45].

4.2.1.1. Composição

Um destilador solar é composto de cinco partes: (i) tanque, (ii) estruturas de suporte, (iii) cobertura, (iv) canaleta de recolha, e (v) isolamento térmico.

Tanque

O tanque contém a água de alimentação que será destilada. A água pode ser alimentada continuamente ou de forma intermitente, mas a quantidade de água no tanque (base) deve ser mantida constante de forma a evitar perdas bruscas de quantidade de calor [36].

Também deverá ser à prova de água e pintado de uma cor escura para que possa absorver melhor a radiação solar e transformá-la em calor. A sua superfície deverá ser lisa para uma melhor limpeza [36 e 45].

A selecção de um material adequado para a construção do tanque constitui um dos principais problemas na construção dos destiladores solares. Cada material tem suas características que devem ser levadas em conta, e o custo e disponibilidade local são factores importantes. Eles devem ter uma longa vida útil nas condições às quais serão expostos ou suficientemente baratos para serem substituídos quando necessário. Devem ser resistentes às intempéries. Não devem ser tóxicos ou emitir vapores que possam transmitir à água um sabor desagradável quando houver altas temperaturas. Devem ter um peso e tamanho adequado ao transporte e

montagem. Também devem ser resistentes à corrosão e à água destilada (que provoca muitas reacções químicas). A corrosão que ocorre no contacto com a água é tão severa que mesmo os tanques feitos de metais protegidos por anticorrosivos são danificados. Por exemplo: tanques feitos de cobre são destruídos em poucos anos; ferro galvanizado e alumínio anodizado duram apenas alguns meses, mesmo para alumínio de construção naval; fibra de vidro, para além de desenvolver trincas ao longo dos anos devido a variação da humidade e temperatura, é caro e contém resinas como de poliéster e epoxi que dão gosto e cheiro à água por meses ou mesmo anos; o concreto, apesar de ser simples e de baixo custo, pode sujeitar-se ao surgimento de trincas em poucos anos de uso [45].

Como já foi referido, as funções do tanque são receber a radiação solar que é transmitida através da cobertura, com o mínimo possível de perdas para a envolvente. Devido ao carácter intermitente da radiação solar, existe a necessidade de armazenar energia quando esta se encontra em excesso e, libertar aquela energia quando necessário.

A taxa de evaporação depende igualmente da área de exposição da água do tanque com a massa de ar em circulação.

A profundidade do tanque é um parâmetro de grande importância na produtividade dos destiladores solares e é inversamente proporcional à produção da unidade [60,61, 63 e 64].

Normalmente argumenta-se que profundidades maiores reservam uma energia extra em forma de calor, o que aumentaria a produção nocturna, quando a temperatura do ar exterior é menor. Na prática, nenhum destilador com tanques mais profundos consegue atingir a eficiência típica de 43% dos destiladores de tanque raso. Quanto mais raso o tanque, melhor o resultado. Mas por outro lado, se o tanque é raso demais, ele secar-se-á facilmente (em um dia de verão o destilador pode evaporar 0.5 cm de profundidade de água) e haverá mais depósitos de sal, o que não será bom para seu desempenho [45]. A produtividade da unidade diminui com o aumento da profundidade do tanque nas horas de maior índice de radiação solar (8h00-17h00). Por outro lado, a noite, o efeito é contrário. Com o aumento da profundidade do tanque, aumenta também a massa de água do tanque a aquecer, diminuindo a temperatura da água para uma dada quantidade de radiação recebida. Por sua vez, ao aumento da massa de água, corresponderá um incremento da respectiva capacidade térmica, permitindo que uma maior quantidade de energia seja armazenada no interior do tanque. Este facto faz com que a energia seja continuamente libertada, possibilitando uma produção continua mesmo durante a noite, quando a radiação solar é nula. Para um tanque raso (menores profundidades), a capacidade térmica da água é menor e, a temperatura da água será maior. Este facto faz

aumentar a taxa de evaporação e, conseqüentemente, a produção de destilado. Ao contrário do que sucede com os tanques profundos, nos tanques rasos, qualquer alteração da radiação solar afectará imediatamente a temperatura da água e a produção. Para estes casos (tanques rasos), a produção nocturna é muito menor [60].

Cerca de 11% da radiação recebida pelo tanque é reflectida sem ser aproveitada. Com o intuito de melhorar a percentagem de energia solar que é absorvida pelo tanque, foram adoptadas diversas técnicas para o aumento deste coeficiente de absorção. Uma técnica bastante simples, mas eficaz é, adicionar corantes à água a tratar [65]. Quando a água é adicionada com corante, a radiação solar é absorvida pela camada superior do tanque, o que faz com que a temperatura da camada de cima seja consideravelmente superior, aumentando a taxa de evaporação. Outra técnica usada é a adição de materiais absorventes juntamente com a água do tanque. Borracha e carvão são alguns dos materiais usados para esse efeito [66 e 67]. Existem alguns materiais que têm a capacidade de armazenar uma grande quantidade de energia térmica, aumentando consideravelmente a capacidade térmica do tanque, bem como a absorção de energia. Vidro, borracha e cascalho são alguns dos materiais que possuem aquelas propriedades [68]. Resultados experimentais mostram que o uso de borracha preta nos tanques profundos conduz a um incremento de produtividade de 20%, enquanto o uso de cascalho nos tanques rasos leva a um aumento de produtividade de 19%.

Existe ainda uma técnica bastante utilizada para o aumento da taxa de evaporação. Esta técnica consiste no aquecimento de apenas uma pequena camada superior de água do tanque (semelhante ao que acontecia no uso de corantes), usando uma placa para separar a camada superior de água da camada inferior. A radiação solar é recebida pela placa separadora e, uma porção dessa radiação é usada no aquecimento do topo da camada de água, aumentando assim a sua temperatura e levando a um conseqüente incremento de produtividade. A restante porção da radiação solar é usada para aquecer a camada inferior do tanque, armazenando energia, que poderá ser utilizada mais tarde nos períodos de baixa intensidade solar. O material usado bem como a espessura da camada superior de água são parâmetros que afectam a produtividade; o uso de uma placa de alumínio preta, com 2 cm de camada de água aumenta a eficiência do sistema em 28% [65].

Cobertura

Depois do tanque, a cobertura é o componente mais crítico do destilador solar. Ela é montada acima do tanque e deve transmitir o máximo de radiação dentro da faixa do espectro solar e

manter o calor gerado dentro do destilador. Isto significa ter o melhor índice de refração e a maior transparência possível. Além do mais deve permitir a condensação do vapor e a consequente formação de uma lâmina de água que escorrerá sob ele.

A cobertura de vidro fica em uma posição inclinada (o valor ideal está entre 10° e 15°) de modo a evitar o retorno das gotas d'água para o tanque [36 e 45].

Idealmente, um material para a cobertura deve ser bastante forte para resistir à ventos, chuvas, granizo e mesmo pequenos movimentos de terra, além de não permitir a entrada de insectos e outros tipos de pequenos animais [45]. Outros factores a serem analisados para a escolha do material de cobertura são custo, peso, vida útil, disponibilidade local, tolerância a altas temperaturas e resistência mecânica, além de altos valores de transmissão para a faixa do espectro solar na região do ultravioleta e baixos valores para o infravermelho (para gerar um bom efeito estufa). Existem vários materiais sendo aplicados para a construção da cobertura de destiladores: materiais plásticos (polietileno de alta densidade, polipropileno e policarbonato), vidro comum e temperado. O material mais utilizado na cobertura é o vidro, uma vez que possui grande parte das características desejáveis para uma cobertura eficiente. O vidro comum apresenta custo competitivo e boa performance em relação à produção de destilado. Por outro lado, o vidro temperado é resistente à altas temperaturas e produz mais destilado. Contudo, seu custo é muito mais elevado e é mais pesado, já que habitualmente é fabricado apenas em espessuras acima de 5 mm.

Os materiais plásticos têm menores custos, excepto o policarbonato. Porém, não são tão apropriados porque podem gerar um efeito chamado de *wettable* em que as gotas d'água não se fixam bem à cobertura e acabam por cair de volta no tanque. Além disso, degradam-se mais facilmente a altas temperaturas contínuas [57, 36 e 45].

No que concerne à cobertura da unidade, os destiladores solares podem apresentar duas configurações típicas, uma com uma única inclinação (*single-slope*), Figura 4.3 - b), e outra, com dupla inclinação (*double-slope*), Figura 4.3- a).

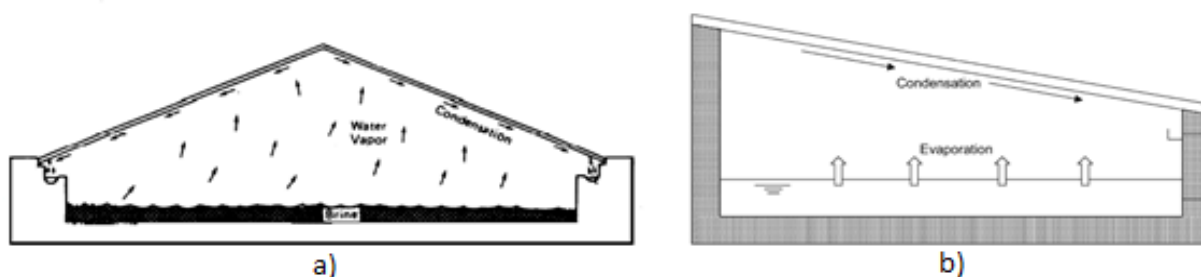


Figura 4.3: a) Double slope b) Single slope [55].

Para baixas latitudes, as unidades de dupla inclinação são preferíveis, enquanto para latitudes superiores a 20° deve-se optar por unidades com uma única inclinação. Isto deve-se ao facto de que se as unidades de dupla inclinação forem usadas em lugares de latitude elevada, apenas um lado da cobertura vai estar exposto à radiação solar, sendo neste caso, contraproducente o uso de unidades de dupla inclinação [55]. O rendimento da unidade de destilação é máximo para uma inclinação da superfície da cobertura correspondente à latitude do lugar onde esta é instalada, uma vez que, uma cobertura com inclinação igual à latitude do local receberá os raios solares aproximadamente normais à superfície durante todo o ano [56].

A transferência de calor através da cobertura aumenta com a diminuição da espessura e com o aumento da condutividade térmica da cobertura. Uma unidade de destilação com uma espessura da cobertura de 3 mm conseguiria um acréscimo de 16,5% na produção, em comparação com uma espessura de 6 mm.

As propriedades ópticas do vidro dependem essencialmente da sua percentagem de óxido de ferro (Fe_2O_3), do tratamento superficial aplicado, do ângulo da radiação incidente e da sujidade ou condensação superficial [57].

Como já foi indirectamente referido acima, a temperatura da cobertura é um dos parâmetros mais importantes da destilação solar. A diminuição desta temperatura leva a um incremento de produtividade, uma vez que, a diferença de temperatura entre a cobertura e o tanque aumenta, provocando um acréscimo na transferência de calor convectiva e evaporativa entre o tanque e a cobertura devido, a um aumento da circulação natural da massa de ar no interior da unidade. Uma das técnicas, denominada de regenerativa, de redução da temperatura da cobertura é conseguida recorrendo-se ao arrefecimento desta através de um filme de água que flui continuamente sobre a cobertura, ou de maneira intermitente [59 e 62]. A água de refrigeração recebe o calor latente de condensação que, por sua vez, é reaproveitado com a introdução desta água no interior do tanque. A produção na destilação regenerativa é 20% mais elevada quando comparada com o sistema simples (destilação solar passiva) [58].

Calha de recolha

A calha de recolha fica localizada na base da cobertura de vidro e serve para recolher a água condensada e levá-la para o local de armazenamento. Deve ser bastante pequena para não criar sombreamento no tanque. Também deve ser construída com o mesmo material do tanque, podendo variar conforme necessidades e custos [36 e 45].

Outras partes

Ao tratar da composição de um destilador solar não se pode deixar de tratar do isolamento térmico. Sem o isolamento adequado, as perdas de calor aumentam e ocasionam a diminuição da eficiência em cerca de 14% para tanques com profundidades curtas (até 20 cm). O isolamento térmico é feito por baixo do tanque, externamente. São relatados o uso de madeira, plástico, palha de coco, lã de vidro, areia e fibra de agave como materiais isolantes [36]. O custo do isolamento térmico pode chegar a 16% do custo de construção do destilador. Para além de baratear o custo, o uso de areia na base serve para diminuir as perdas de calor, pois ela serve como um armazenador, que acumula calor durante o dia e o devolve para o tanque à noite, mantendo o processo de destilação após o pôr-do-sol [36 e 45]. Em locais com grande incidência de radiação solar o uso de isolamento térmico não é economicamente compensador, principalmente se o destilador é construído sobre um solo seco e com boa drenagem.

Os vedantes são fundamentais para uma eficiente operação dos destiladores, pois são usados para fixar o vidro ao resto da estrutura, absorver as diferentes expansões dos materiais além de manter o ar quente preso dentro da estrutura, evitando perdas de calor [45]. Os vedantes devem ser de materiais resistentes à abrasividade e a corrosividade do vapor da água e devem resistir às pressões de ar quente, além de serem flexíveis às expansões térmicas que ocorram [36]. A vedação deve ser realizada de forma cuidadosa, para evitar a possível formação de zonas de perda de destilado e evitar a entrada de água de chuva e a introdução de microrganismos na água destilada.

Canalizações e válvulas são necessários para a alimentação de água no sistema, drenagem e transporte da água destilada para o reservatório final [36 e 45].

O local de armazenamento da água destilada deve ser constituído de material que não interaja com as propriedades do destilado e deve também estar devidamente limpo para evitar contaminação [36]. O material do reservatório de água destilada deve ser muito bem escolhido, pois a água destilada é muito agressiva quimicamente, querendo dissolver quase toda substância com a qual entra em contacto. Uma boa escolha é o aço inoxidável. O ferro galvanizado dura apenas poucos anos, e adicionará zinco e ferro à água. O betão também pode ser utilizado, mas irá deteriorar-se ao longo dos anos. O carbonato de cálcio que é liberado por ele poderá acertar a água destilada mais adequadamente à dieta humana. Em geral são adicionados pedaços de pedra calcária ou de mármore para melhorar a qualidade da água, o que diminui o ataque químico ao reservatório [45]. O tamanho e volume do local de

armazenamento devem ser definidos conforme necessidade do projecto. A capacidade do reservatório deve ser de quatro a cinco vezes a produção diária do destilador [36 e 45].

Os suportes da cobertura de vidro podem ser feitos de madeira, metal, ou pela própria estrutura de concreto. A madeira tem a vantagem de ser facilmente trabalhada e de não exigir mão-de-obra muito especializada, mas deteriora-se facilmente, principalmente sob condições de alta humidade e temperatura. No caso de metais eles ficam sujeitos à corrosão, mas por outro lado são mais indicados para se manter uma boa selagem íntegra. Geralmente os suportes são feitos de alumínio ou aço galvanizado, que durarão bastante se devidamente protegidos [45].

4.2.1.2. Classificação dos destiladores solares

Consoante o tipo de energia aplicada ao tanque de água, os sistemas de destilação solar são classificados dividindo-se em sistemas passivos e sistemas activos. Nos sistemas activos, uma parcela extra de energia é introduzida no tanque de água, promovendo uma evaporação mais rápida. A parcela extra de energia pode ser introduzida por um colector/concentrador solar, por aproveitamento de energia térmica das indústrias [64 e 69 e 70], etc. Quando comparados com os sistemas passivos, o sistema activo consegue uma melhoria na produção em cerca de 3 a 4 vezes, embora sejam menos eficientes termicamente [64].

Se nenhum modo extra de energia for usado, o sistema é conhecido por destilador solar passivo. A destilação solar passiva é a solução economicamente mais recomendada para fornecimento de água potável, enquanto o sistema activo é a solução mais atractiva do ponto de vista comercial [61].

4.2.1.3. Vantagens e desvantagens dos destiladores solares

Vantagens

A destilação solar é, de entre as tecnologias existentes, a que mais se adequa técnica e economicamente às regiões subdesenvolvidas e desprovidas de energia eléctrica, que tenham carências de água potável embora com reservas de água salgada para a respectiva destilação,

além dos elevados índices de radiação solar. Deste modo, adequa-se perfeitamente ao perfil da área em estudo.

Constitui uma técnica muito simples, sem necessidade de grande tecnologia nem componentes electrónicos ou partes (mecânicas) móveis, tendo uma operação bastante simples e não requerendo altos custos de manutenção, nem de mão-de-obra qualificada. Pode ser instalada próxima ao local onde há procura de água e onde a água de alimentação encontra-se disponível, diminuindo custos significativos com o transporte da água de alimentação até o dispositivo de dessalinização e deste até a comunidade atendida. Também, podem ser usados materiais e mão-de-obra locais, contribuindo para o desenvolvimento da economia local. O combustível utilizado na destilação é gratuito e de origem renovável e assim, o processo é silencioso, não poluente e autónomo do ponto de vista energético. A taxa de produção de destilado é proporcional à área da instalação, o que se traduz num custo por unidade de medida de água praticamente constante, não diminuindo este com o aumento da capacidade, em contrapartida com outras técnicas de destilação. A destilação solar é a técnica que melhor qualidade de água produz, já que esta é totalmente desprovida de microorganismos. É possível que haja produção de destilado mesmo durante a noite, devido ao calor armazenado na massa de água. Com a destilação solar, locais sem condições de residência podem começar a ser povoados, aliviando-se a pressão nas áreas urbanas e, criando-se novos pontos de interesse e turismo no planeta [45 e 71].

Desvantagens

Uma das grandes desvantagens da destilação solar prende-se com a sua baixa capacidade de produção [64]. Devido à baixa produção por unidade de área, esta tecnologia solar requer uma grande área de instalação para produzir grandes quantidades de água. Em locais onde tais áreas não estão disponíveis, ou o seu preço por m^2 seja elevado, a escolha terá de recair noutras alternativas. No caso do local de estudo, há disponibilidade de terra para a implantação desse processo, portanto, a princípio, esse fato não acarretaria um impedimento ao seu uso no local [45]. Para os destiladores solares passivos, a produção diária de destilado é, em média, de $1-3 \text{ kg}/m^2/\text{dia}$, enquanto nos destiladores solares activos esse número sobe até cerca de $3-7 \text{ kg}/m^2/\text{dia}$ [64]. Quando as necessidades de água potável, num determinado lugar, excedam os $200 \text{ m}^3/\text{dia}$, devem ser considerados outros tipos de tecnologias, o que não corresponde ao caso em estudo. Uma outra condicionante dos destiladores solares advém do facto, de a produção de água ser altamente dependente das condições meteorológicas. A

energia solar está disponível somente pela metade do dia. Isto implica que o processo opera somente durante a metade do tempo disponível, a menos que algum dispositivo de armazenamento seja usado para operar o sistema durante os períodos de baixa insolação e à noite. No dispositivo de dessalinização proposto nesse estudo, não será incluído nenhum dispositivo de armazenamento, geralmente caro. Como o período de maior necessidade de água coincide com o período de melhor desempenho do sistema foi considerado que, a princípio, um aumento do número de horas em operação para além do tempo em que o Sol brilha, aumentaria significativamente o custo do sistema.

Como a água destilada não é própria para o consumo humano a longo prazo, devido a características fisiológicas, pequenas quantidades de sais devem ser adicionadas precisamente à água antes que ela chegue ao usuário. [45].

4.3. O sistema de dessalinização proposto

O dispositivo de dessalinização proposto trata-se de um destilador passivo posicionado com sentido Norte-Sul, cuja configuração pode ser visualizado na Figura 4.4.

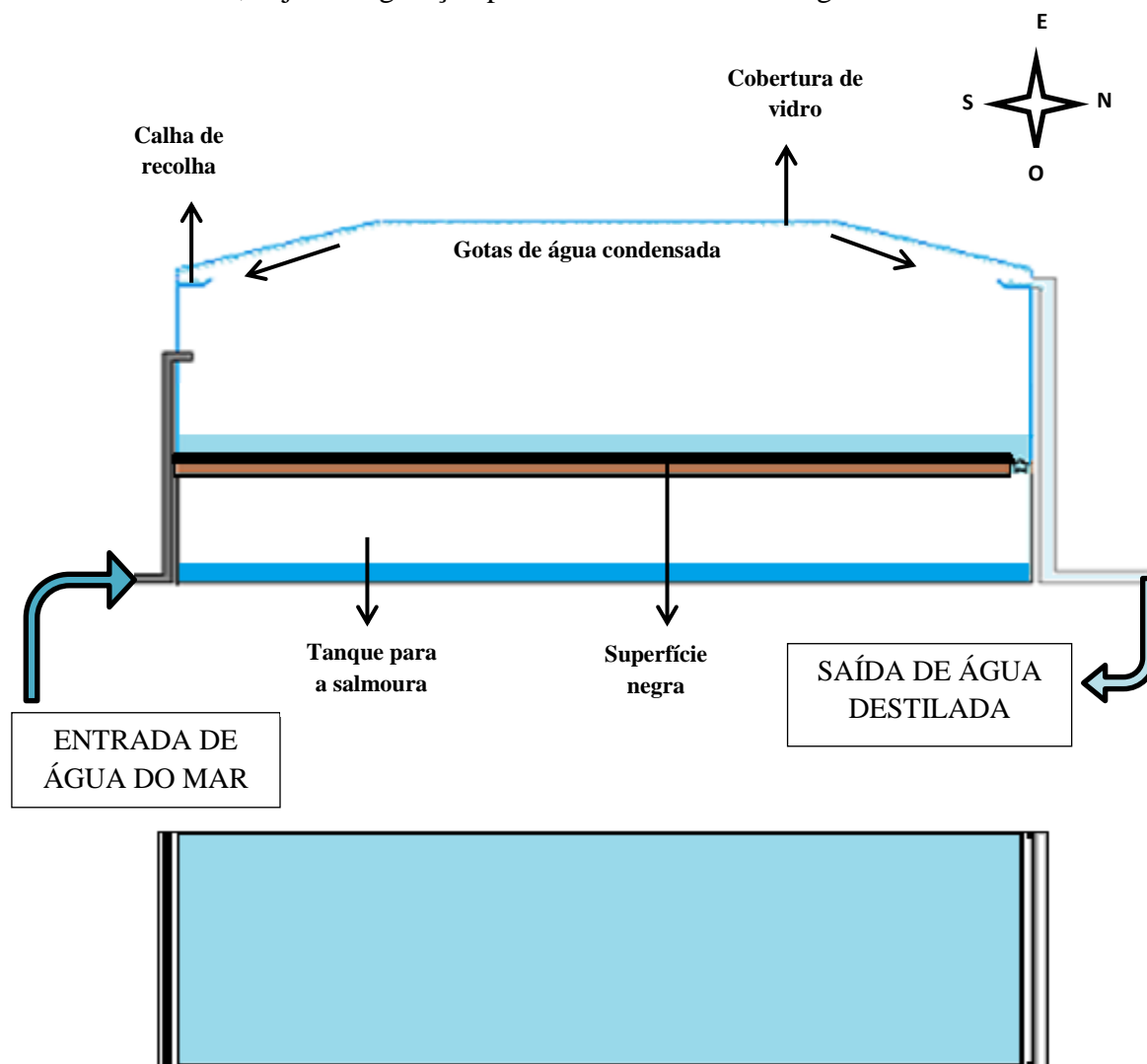


Figura 4.4: Configuração do destilador proposto (vista de frente) em cima; tanque de água a destilar (vista de cima) em baixo.

Apresentará uma cobertura configurada com dupla inclinação pois, a zona de Salamansa trata-se de uma zona de baixa latitude (inferior a 20°).

O rendimento da unidade de destilação é máximo para uma inclinação da superfície da cobertura correspondente à latitude do lugar onde esta é instalada. Deste modo, a cobertura do destilador terá uma inclinação de 15° sendo suficiente para evitar o retorno das gotas d'água para o tanque.

De seguida apresentam-se as dimensões dos principais constituintes do destilador.

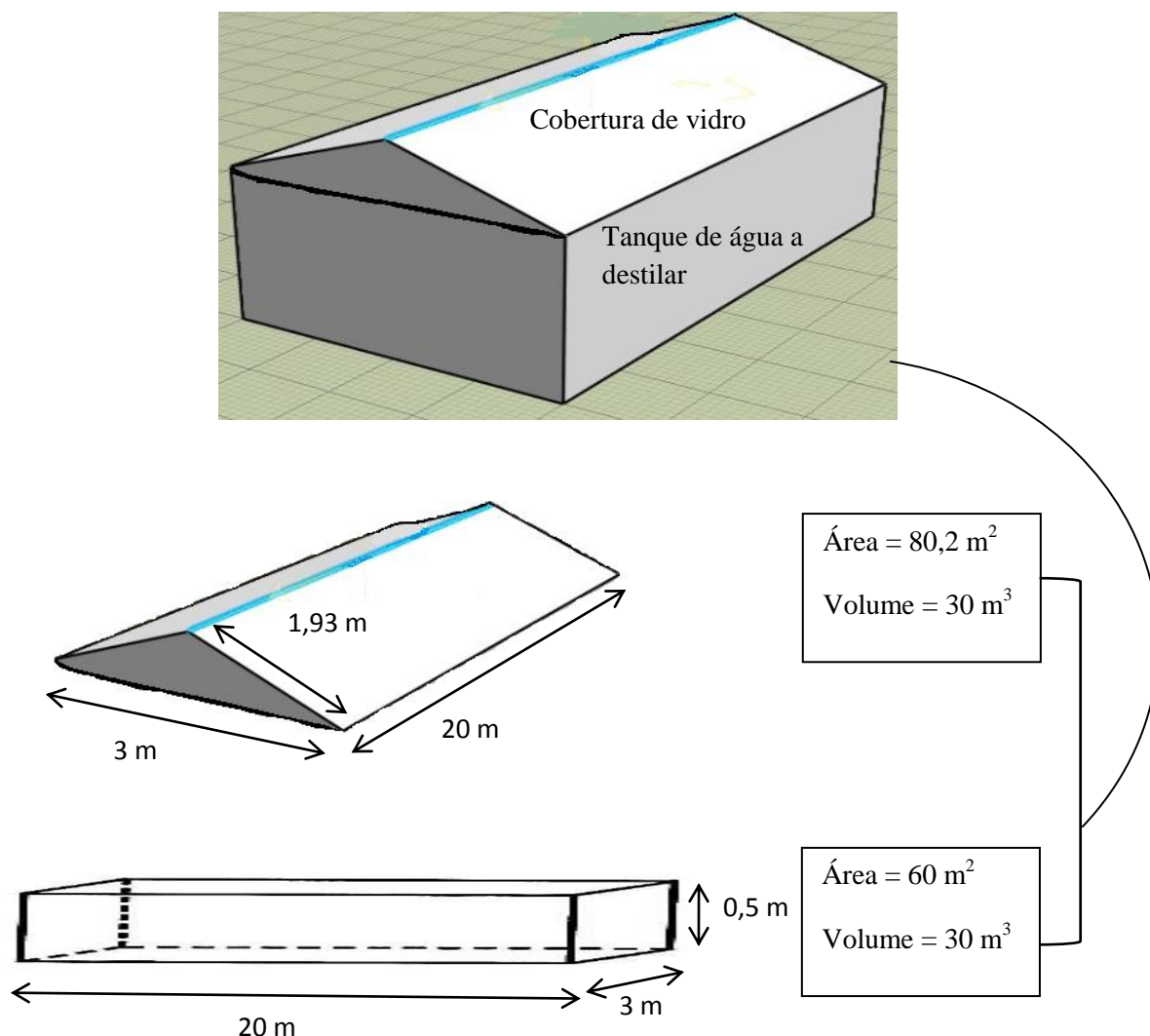


Figura 4.5: Dimensões da estrutura do destilador proposto.

A lâmina de água terá um volume de $1,2 \text{ m}^3$ ($20 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$). A alimentação do destilador será feita de uma maneira diária, de uma só vez, uma ou duas horas antes do nascer do sol ou três a quatro horas após o pôr-do-sol de forma a evitar perdas bruscas de quantidade de calor. É suficiente colocar uma vez o volume da produção diária pois este não será evaporado de todo.

O tanque será pintado tanto por dentro como por fora de uma cor escura para aumentar a absorção de radiação solar.

A calha de recolha terá 2 cm de largura, sendo pequena para não criar sombreamento no tanque.

Para alimentação e complemento da instalação de dessalinização serão construídas ainda as seguintes estruturas:

- Um depósito destinado ao armazenamento da água destilada. A capacidade do reservatório para a água destilada deve ser de quatro a cinco vezes a produção diária do destilador. Neste caso, o volume poderá ser de $1,5 \text{ m}^3$.
- Um sistema de condutas para levar a água bruta do mar ao tanque de destilação, a água destilada do canaleta de recolha ao tanque de armazenamento bem como para a descarga da salmoura ao mar.
- Um mini-tanque por onde a salmoura é drenada antes de ser encaminhada para o mar que ficará situado debaixo do tanque de água a destilar como mostrado na Figura 4.4.

O sistema proposto foi idealizado para abastecimento descentralizado de água numa escala doméstica para suprir as necessidades de algumas famílias e dirigido somente por energia solar, sem necessidade do uso de outras fontes de energia. De acordo com a ONU, cada pessoa necessita de cerca de 110 litros de água por dia para atender as necessidades de consumo e higiene. Para abranger um maior número de famílias e sabendo que a destilação solar é uma técnica de baixa eficiência, neste estudo tentar-se-á atender apenas as necessidades de consumo.

A dessalinizadora localizar-se-á ao lado da Praia de Salamansa, conforme está espelhado na Figura I.1 em Anexo.

4.3.1. A escolha do material

A cobertura do destilador será de vidro com uma espessura de 4 mm. Esta espessura é mais apropriada em relação a espessuras maiores (como 8 e 12 mm) pois, aumenta a quantidade de água destilada, a temperatura da água, o coeficiente de transferência de calor por evaporação, o coeficiente de transferência de calor por convecção, bem como a eficiência do destilador [73].

O tanque de água a destilar será constituído por tijolos maciços refractários (23 x 11,5 x 5,1 cm) sendo o seu assentamento feito com argamassa refractária, pois têm elevado ponto de fusão sendo capazes de suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-

químicas, entre elas, resistência, alta condutividade térmica. Possuem também outras características como: baixo coeficiente de dilatação térmica, alta resistência à compressão, corrosão, impactos, choques térmicos, e não devem reagir com as substâncias as quais venham a ter contacto. Habitualmente são aplicados em revestimento de lareiras, fornos, chaminés, etc [82 e 83].

Não será economicamente compensador o uso de isolamento térmico devido a três razões: há grande incidência de radiação solar, o destilador será construído sobre um solo seco e arenoso e as paredes e fundo no tanque serão construídos com tijolos maciços refractários que por si só actuam como isolantes.

Os suportes da cobertura de vidro como o canaleta de recolha podem ser construídos com betão refractário ficando assim com as mesmas propriedades do tanque.

No dispositivo de dessalinização, o material por onde a água circula deve permitir uma boa transmissão de energia, facilitando as trocas de calor e menor corrosão. Neste caso, escolhe-se o aço inoxidável como o material mais adequado para constituir os tubos por onde passará a água.

O reservatório de água destilada será construído com betão. Este, apesar de se deteriorar ao longo dos anos, poderá ser uma opção menos dispendiosa. Por outro lado, o carbonato de cálcio que é liberado por ele poderá acertar a água destilada mais adequadamente à dieta humana. No entanto, poderão ser adicionados pedaços de pedra calcária ou de mármore para melhorar a qualidade da água diminuindo o ataque químico ao reservatório.

4.4. Modelação matemática

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático utilizado para o dispositivo proposto nesta dissertação. As equações formuladas são a base do modelo numérico desenvolvido, apresentado em Anexo. O *software* aplicativo utilizado para o cálculo do modelo foi o *Engineering Equation Solver* (EES) que é usado para Resolução de Equações Engenharia. Este *software* fornece a solução de um conjunto de equações algébricas assim como a resolução de equações diferenciais, equações com variáveis complexas, regressão linear e não-linear, simplifica análises de incertezas e fornece animações [75]. É um aplicativo que resolve múltiplas equações que podem envolver funções termofísicas de diversos materiais

como temperatura, entalpia, entropia, condutibilidade térmica, pressão e outras. Além disso, o EES possui também ferramentas que permitem gerar tabelas onde se pode calcular simultaneamente os resultados de uma ou mais equações para diversos valores de uma dada variável, e a partir daí gerar gráficos ou obter equações pela regressão linear [76].

Em todas as modelações apresentadas de seguida, foram usadas duas datas específicas para o local de estudo: o solstício de Dezembro (21 de Dezembro) e o solstício de Junho (21 de Junho), com os dados climáticos do ano 2011.

4.4.1. Modelo ambiental

No modelo ambiental é realizado o estudo das condições climatológicas de um dado local. É neste modelo que pode ser feita a modelação da radiação solar, da temperatura ambiente e da velocidade do vento. Neste estudo não se fará a previsão da temperatura ambiente e da velocidade do vento do local em estudo pois serão usados dados obtidos pela referência [77] correspondente ao histórico do tempo da cidade do Mindelo assumida como se fossem de Salamansa, tendo em conta que apresentam as mesmas condições climatológicas, dada a proximidade dos dois locais.

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 são apresentados os valores da temperatura ambiente e da velocidade do vento para as datas específicas mencionadas anteriormente.

| Hora Local | Temperatura ambiente (°C) | Velocidade do vento (m/s) |
|------------|---------------------------|---------------------------|
| 07:40 | 25,3 | 7,22 |
| 08:40 | 26,2 | 8,33 |
| 09:40 | 27 | 9,44 |
| 10:40 | 27,5 | 10,28 |
| 11:40 | 27,2 | 11,94 |
| 12:40 | 27 | 11,39 |
| 13:40 | 26,8 | 10,97 |
| 14:40 | 26,6 | 10,56 |
| 15:40 | 26 | 10,00 |
| 16:40 | 25,5 | 9,72 |
| 17:40 | 25 | 9,31 |
| 18:40 | 24,6 | 8,89 |
| 19:40 | 24,2 | 8,33 |

Tabela 4.6: Variação horária da temperatura e velocidade do vento no dia do solstício de Junho.

| Hora Local | Temperatura ambiente (°C) | Velocidade do vento (m/s) |
|------------|---------------------------|---------------------------|
| 08:40 | 23,4 | 6,11 |
| 09:40 | 24 | 7,22 |
| 10:40 | 25,6 | 8,19 |
| 11:40 | 25,6 | 8,19 |
| 12:40 | 24,9 | 7,78 |
| 13:40 | 24,9 | 7,78 |
| 14:40 | 24,9 | 7,64 |
| 15:40 | 24,5 | 7,22 |
| 16:40 | 24,5 | 6,67 |
| 17:40 | 24 | 6,39 |
| 18:40 | 23,6 | 5,97 |

Tabela 4.7: Variação horária da temperatura e velocidade do vento no dia do solstício de Dezembro.

Neste trabalho apenas se fará a modelação da radiação global incidente em superfície inclinada que será calculada através da conversão dos dados da radiação solar total em superfície horizontal facultados pelo INMG.

A Tabela 4.8 apresenta os dados referentes à radiação total horária no plano horizontal para os dias específicos.

| Solstício de Junho | | Solstício de Dezembro | |
|--------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Hora legal | Radiação (W/m ²) | Hora legal | Radiação (W/m ²) |
| 07:40 | 36,56 | 08:40 | 30,76 |
| 08:40 | 204,04 | 09:40 | 257,87 |
| 09:40 | 449,01 | 10:40 | 357,74 |
| 10:40 | 482,33 | 11:40 | 437,86 |
| 11:40 | 538,01 | 12:40 | 301,03 |
| 12:40 | 694,80 | 13:40 | 315,48 |
| 13:40 | 799,06 | 14:40 | 685,09 |
| 14:40 | 924,87 | 15:40 | 554,06 |
| 15:40 | 825,60 | 16:40 | 429,98 |
| 16:40 | 537,69 | 17:40 | 273,26 |
| 17:40 | 378,74 | 18:40 | 83,11 |
| 18:40 | 187,21 | — | — |
| 19:40 | 50,97 | — | — |

Tabela 4.8: Variação horária da radiação total em plano horizontal no Verão e Inverno.

Tanto os dados de temperatura ambiente e velocidade do vento como os valores obtidos para o tempo solar e a radiação total em plano inclinado serão necessários para a simulação do modelo de destilação passiva apresentado mais adiante.

4.4.1.1. Radiação Solar

Devido à distância entre a Terra e o Sol, as radiações electromagnéticas provenientes do Sol atingem a superfície terrestre de forma paralela e uniforme. Apenas uma infinitésima parte da radiação solar chega à superfície da Terra, mas com expressão suficiente que justifica o desenvolvimento de tecnologia necessária para poder aproveitá-la [53,74 e 78].

A atmosfera reduz a radiação solar através da reflexão, absorção (ozono, vapor de água, oxigénio, dióxido de carbono) e dispersão (partículas de pó, poluição). A energia solar disponível na Terra é muito variável e, para uma determinada localização, esta variação depende da latitude geográfica, do dia e do ano [79].

A radiação global que atinge um plano localizado na superfície terrestre pode ser decomposta em três componentes [80 e 81]:

- Radiação directa: constituída pelos raios solares recebidos do Sol, ou seja, é a radiação que chega à superfície vinda directamente do disco solar (cerca de 70% do total da radiação);
- Radiação difusa: proveniente de todo o céu visível, excluindo o disco solar, e originada pelos raios não directos e dispersos pela atmosfera. É muito variável no tempo, ou seja, é a radiação que é difractada pelas nuvens e poeiras em suspensão (cerca de 28% do total da radiação);
- Radiação refletida: constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo, denominada de radiação de albedo, ou seja, é a radiação que chega a uma superfície ao ser refletida por outra superfície (cerca de 2% do total da radiação).

4.4.1.2. Tempo solar e geometria solar

O cálculo da intensidade de radiação solar incidente numa dada superfície depende, entre outros factores, do movimento aparente do Sol no referencial dessa superfície. É assim imperativo o conhecimento preciso da localização do Sol. Para isso é necessário não só conhecer os ângulos, que permitem descrever o movimento do Sol em relação à superfície, como também definir-se uma variável tempo. Nos cálculos referentes à geometria solar, a unidade de tempo usada é o tempo solar e não o tempo legal (nos relógios). Torna-se assim necessário converter o tempo legal no tempo solar, aplicando duas correcções [53, 78 e 84]:

$$\text{Hora solar} = \text{hora padrão} + 4(Lst - Lloc) + E \quad (4.1)$$

A primeira correcção deve-se ao facto da diferença entre a longitude do meridiano onde se encontra baseada a hora local (Lst) e a longitude local (Lloc). Na equação 4.1 considera-se a longitude positiva quando medida para Oeste e negativa quando medida para Este. A segunda correcção tem a ver com as perturbações da taxa de rotação da Terra, devido ao efeito combinado da excentricidade da sua órbita e da inclinação do seu eixo de rotação (23,45°). Este efeito é descrito pela equação do tempo:

$$E = 9,87\text{sen}(2B) - 7,53\cos(B) - 1,5\text{sen}(B) \quad (4.2)$$

Em que $B = \frac{360(n - 81)}{364}$

Na qual E é a equação do tempo em minutos e n é o dia do ano $1 \leq n \leq 365$.

A fim de que se possa aproveitar a radiação solar para geração de energia, é necessário conhecer e descrever a posição e o movimento do Sol em relação à Terra e as superfícies receptoras dessa radiação. Para tanto uma série de ângulos são definidos bem como a relação entre eles [53 e 78]:

- Latitude, (ϕ): é a distância angular medida sobre a superfície da Terra a partir do Equador até o ponto em questão. É considerada positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul ($-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$);
- Longitude, L: arco do Equador compreendido entre o meridiano que passa por Greenwich e o meridiano que passa no observador. Varia de 0 a 180° Leste ou Oeste, a partir de Greenwich. Meridiano é uma linha vertical imaginária traçada de pólo à pólo e a cada grau (1°) a partir da linha que passa pela localidade inglesa de Greenwich.
- Declinação, (δ): é a posição angular do Sol, ao meio dia, em relação ao plano do Equador. Ao norte do Equador, a declinação é positiva, caso contrário, negativa ($-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$);
- Inclinação, (β): é o ângulo entre o plano da superfície em estudo e o plano horizontal ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$);

- Ângulo azimutal da superfície, (γ): é o desvio da projecção no plano horizontal da normal à superfície a partir do meridiano local, tem o valor 0 quando indica o Sul, para Este é negativo e para Oeste é positivo ($-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$);
- Ângulo de incidência, (θ): é o ângulo entre a radiação directa na superfície e a normal à superfície;
- Ângulo de incidência zenital, (θ_z): é o ângulo formado entre o feixe de radiação e a vertical do local. O ângulo zenital coincide com o ângulo de incidência quando o plano está na horizontal;
- Ângulo horário, (ω): é a distância angular entre o feixe solar e o meridiano local. É considerado negativo no período da manhã e positivo no período da tarde. Cada hora do dia corresponde a uma variação de 15° .
- Ângulo de pôr-do-sol, ω_s : valor do ângulo horário durante o pôr-do-sol. É idêntico em magnitude ao ângulo do nascer do Sol, porém com sinal negativo, conforme convenção adotada para o ângulo horário (máximo $\pm 180^\circ$).

O ângulo horário Solar ω é dado pela equação 4.3:

$$\omega = (T_s - 12) \frac{360}{24} \quad (4.3)$$

onde T_s corresponde ao tempo solar.

A declinação Solar δ pode ser calculada através da equação de Cooper:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (4.4)$$

Onde n corresponde ao dia do ano.

Os ângulos de incidência θ e de zénite solar θ_z são dados respectivamente pelas equações 4.5 e 4.6.

$$\cos \theta = \cos \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (4.5)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4.6)$$

4.4.1.3. Radiação Solar no plano inclinado

O conhecimento da intensidade de radiação solar recebida sobre uma superfície horizontal é essencial para o cálculo da radiação em qualquer superfície, com um determinado ângulo de inclinação. No entanto, há necessidades de métodos apropriados para transpor os dados da radiação solar em superfície horizontal para uma superfície inclinada. Para o cálculo da radiação Solar no plano inclinado, existem diversos modelos desenvolvidos, com diferentes graus de complexidade e precisão. Esses modelos vão desde o modelo isotrópico (mais simples e conservativo) até ao modelo de Perez (mais complexo e menos conservativo). A principal diferença entre os diversos modelos está relacionada com o tratamento dado à irradiação difusa. A maneira mais simples é considerar a radiação difusa como sendo isotrópica, isto é, com a mesma intensidade de qualquer direcção do céu [53].

Para o presente estudo, optou-se pelo modelo isotrópico cujo cálculo da radiação solar global para uma hora num plano inclinado é obtido através da equação 4.7, que é basicamente composta pela soma das três principais componentes da irradiação incidente na superfície terrestre. O primeiro termo corresponde à contribuição da radiação directa, o segundo à radiação difusa e o terceiro à radiação reflectida pelo solo (albedo) [53 e 84].

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I_p \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (4.7)$$

Onde:

I_T – radiação solar global em superfície inclinada;

I_b – radiação solar directa numa superfície horizontal;

R_b - razão entre a radiação solar directa sobre uma superfície inclinada e a radiação solar directa sobre um plano horizontal;

I_d - radiação solar difusa numa superfície horizontal;

$(1+\cos\beta)/2$ - é o factor forma da superfície de inclinação β ;

I - radiação solar global numa superfície horizontal;

ρ - reflectividade do solo.

O factor R_b é calculado pela seguinte expressão:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (4.8)$$

A radiação solar global numa superfície horizontal (I) constitui a soma da componente directa (I_b) e difusa (I_d) da radiação solar. Deste modo, obtendo o valor de uma das componentes consegue-se chegar ao valor da outra. A componente difusa pode ser estimada relacionando

$$k_T = \frac{I_d}{I_o} \quad (4.9)$$

I_d/I com o índice de transparência (k_T). A variável k_T é definida como a razão entre a radiação solar horária total em superfície horizontal (I) e a radiação horária extraterrestre (I_o ou G_o).

A equação aplicada neste estudo para esta correlação é:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,249k_T & \text{para } k_T < 0 \\ 1,557 - 1,84k_T & \text{para } 0,35 < k_T < 0,75 \\ 0,177 & \text{para } k_T > 0,75 \end{cases} \quad (4.10)$$

Em qualquer ponto no tempo, a radiação extraterrestre num plano horizontal é dada por:

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos\theta_z \quad (4.11)$$

Onde G_{sc} corresponde à constante solar (1353 W/m^2).

4.4.2. Modelo de destilação passiva

O modelo térmico dos destiladores solares passivos é desenvolvido recorrendo-se às equações de balanço de energia aos seus constituintes.

Na Figura 4.6 podem ser observados os diversos mecanismos de transferência de energia presentes na destilação solar passiva.

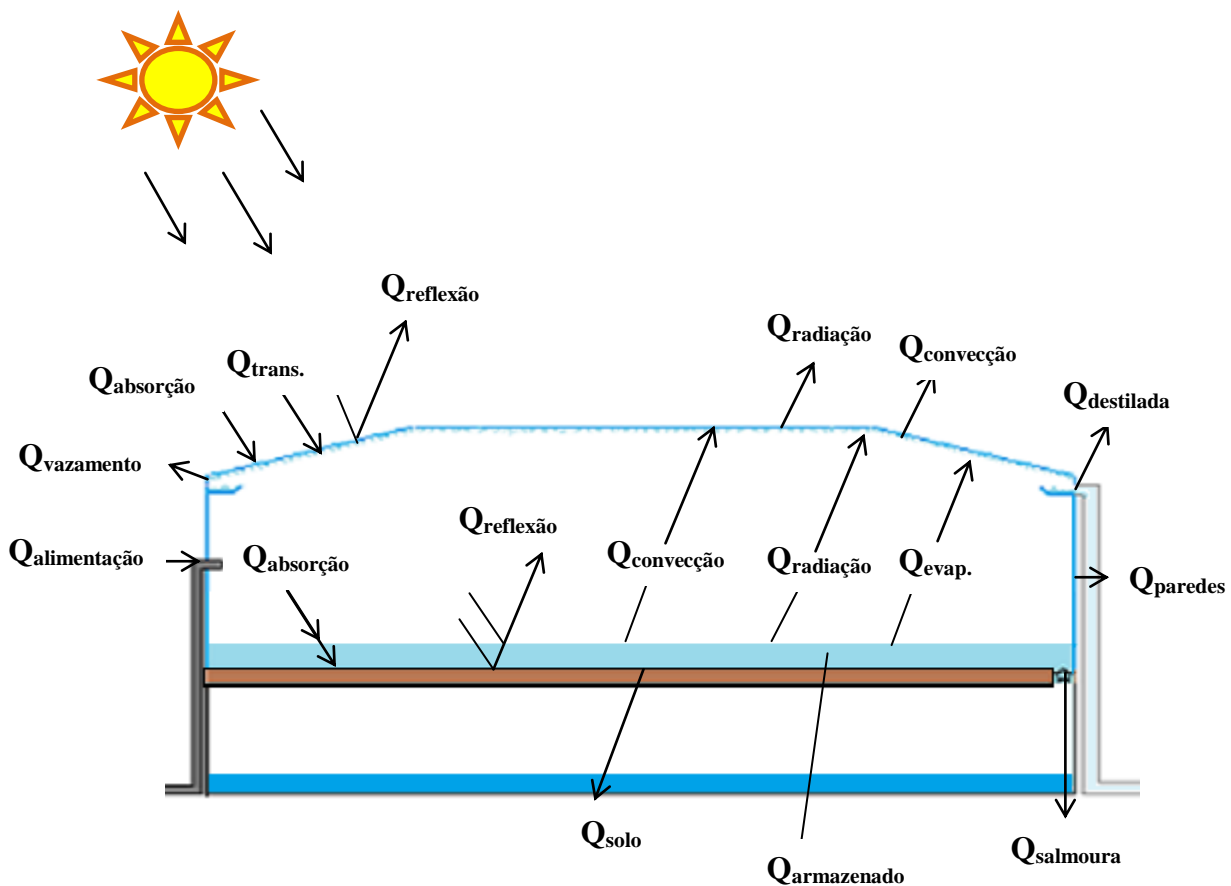


Figura 4.6: Mecanismos de transferência de energia num destilador solar passivo [53]

O objectivo principal de uma unidade de destilação é maximizar a quantidade de água evaporada, Q_{evap} , aumentando assim a produtividade da unidade. Por outro lado, deve-se eliminar, tanto quanto possível, todas as outras formas de transferência de energia do tanque para o meio exterior circundante.

Nos balanços de energia efectuados a cada componente, admite-se a estanquicidade do interior da unidade, não existindo fugas de vapor para o exterior e não existe estratificação da água contida no tanque.

As equações de balanço de energia aos vários componentes do sistema desenvolvidas para a modelação térmica do destilador solar passivo em estudo serão apresentadas de seguida. De referir que esses balanços são baseados nas temperaturas médias dos seus componentes.

Efectuando-se um balanço de energia individual a cada componente, obtêm-se as seguintes equações.

4.4.2.1. Cobertura

A equação de balanço térmico para a cobertura é a seguinte:

$$\alpha_c I_s A_c + h_{tw}(T_w - T_c)A_b = M_c C_c \frac{dT_c}{dt} + h_{1g}(T_c - T_a)A_c \quad (4.12)$$

Como a capacidade calorífica do vidro da cobertura é normalmente pequena quando comparada com a da água e do tanque e, a área da cobertura é aproximadamente igual à área do tanque, nos projectos modernos, quando se faz o balanço de energia na cobertura desprezam a energia acumulada por ela [53]. Deste modo a equação 4.12 resume-se a:

$$\alpha_c I_s A_c + h_{tw}(T_w - T_c)A_b = h_{1g}(T_c - T_a)A_c \quad (4.13)$$

em que h_{1g} representa o coeficiente de transferência de calor convectivo e radiativo combinados entre a cobertura e o meio ambiente e é dado por:

$$h_{1g} = 5,7 + 3,8 * V \quad (4.14)$$

O coeficiente total de transferência de calor da superfície da água para a cobertura, h_{tw} , é definido como a soma dos coeficientes de radiação (h_{rw}), convecção natural (h_{cw}) e de evaporação (h_{ew}), os quais representam os modos de transferência de calor no interior da unidade.

$$h_{tw} = h_{rw} + h_{cw} + h_{ew} \quad (4.15)$$

A transferência de calor por convecção ocorre a partir da mistura ar-vapor para a cobertura; a evaporação ocorre do tanque de água para a mistura ar-vapor, enquanto a condensação ocorre da mistura ar-vapor para a cobertura. As expressões para o cálculo destes coeficientes de transferência de calor são dados por [53 e 85]:

$$h_{rw} = \varepsilon_{eff} \sigma (T_w^2 + T_c^2)(T_w + T_c) \quad (4.16)$$

Onde $\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right]^{-1}$

$$h_{cw} = 0,884 \left[T_w - T_c + \frac{(P_w - P_c)T_w}{268,9 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.17)$$

$$h_{ew} = 16,273 \times 10^{-3} * h_{cw} * \frac{P_w - P_c}{T_w - T_c} \quad (4.18)$$

As pressões parciais de vapor de água, P_w e P_c em função da temperatura podem ser obtidas a partir da seguinte expressão [53]:

$$P(T) = \exp \left[25,317 - \frac{5144}{T} \right] \quad (4.19)$$

onde a temperatura, T é dada em Kelvin e a pressão em Pascal.

4.4.2.2. Massa de água

A equação de balanço térmico para a água é a seguinte:

$$\alpha_w(1 - \alpha_c)I_s A_b = M_w C_w \frac{dT_w}{dt} + h_{tw}(T_w - T_c)A_b + q_k \quad (4.22)$$

Onde $q_k = U_G(T_w - T_a)$ que corresponde às perdas de calor pelo solo.

Uma vez resolvidas as equações de balanço de energia, as quais permitem o cálculo das diversas temperaturas presentes na unidade de destilação, serão agora apresentadas as equações para o cálculo da quantidade de água destilada produzida, assim, como o cálculo da eficiência térmica global da instalação.

A produção horária é dada por:

$$\dot{m}_{ew} = \frac{A_c h_{ew}(T_w - T_c) * (3600 \text{ s. } h^{-1})}{L} \quad (4.23)$$

onde L representa o calor latente de vaporização da água [J/kg].

A produção diária é calculada pelo somatório da produção horária ao longo de um dia (24 horas).

$$\dot{M}_{ew} = \sum_{i=1}^{24} \dot{m}_{ew} \quad (4.24)$$

O cálculo da eficiência térmica global do destilador solar passivo é dado por:

$$\eta_{passivo} = \frac{\sum \dot{m}_{ew} L}{\sum (I_s A_s * (3600 \text{ s. } h^{-1}))} \quad (4.25)$$

5. APRESENTAÇÃO/ ANÁLISE DOS RESULTADOS

A apresentação e análise dos resultados da modelação numérica encontra-se estruturada em duas partes principais: (i) modelação ambiental: conversão do tempo legal para tempo solar e da radiação solar total em superfície horizontal para radiação solar total em superfície inclinada e (ii) modelo de destilação passiva: cálculo do balanço energético do destilador proposto.

5.1. Modelo ambiental

Como foi referido anteriormente, a hora solar quase nunca coincide com a hora do relógio. Tendo em conta que a longitude do meridiano onde se encontra baseada a hora local é 0° e a longitude de Salamansa é 24° , obteve-se os seguintes resultados referentes a conversão da hora local para a hora solar em relação aos dias específicos em estudo.

| Solstício de Junho | | Solstício de Dezembro | |
|--------------------|------------|-----------------------|------------|
| Hora legal | Hora solar | Hora legal | Hora solar |
| 07:40 | 06:00 | 08:40 | 7:00 |
| 08:40 | 07:00 | 09:40 | 8:00 |
| 09:40 | 08:00 | 10:40 | 9:00 |
| 10:40 | 09:00 | 11:40 | 10:00 |
| 11:40 | 10:00 | 12:40 | 11:00 |
| 12:40 | 11:00 | 13:40 | 12:00 |
| 13:40 | 12:00 | 14:40 | 13:00 |
| 14:40 | 13:00 | 15:40 | 14:00 |
| 15:40 | 14:00 | 16:40 | 15:00 |
| 16:40 | 15:00 | 17:40 | 16:00 |
| 17:40 | 16:00 | 18:40 | 17:00 |
| 18:40 | 17:00 | — | — |
| 19:40 | 18:00 | — | — |

Tabela 5.1: Tempo solar considerado para os dias em estudo.

A tabela seguinte mostra as variáveis que se mantêm fixas ao longo dos dias em causa independentemente da hora em questão.

| | Solstício de Junho | Solstício de Dezembro |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Dia do ano | 172 | 355 |
| Declinação Solar (δ) | 23,45 | -23,45 |
| Inclinação da superfície (β) | 15 | 15 |
| Latitude do local (ϕ) | 16,903867 | 16,903867 |

Tabela 5.2: Variáveis fixas utilizadas na modelação numérica.

Como já foi referido e mostrado na Figura 4.4 o dispositivo de dessalinização proposto encontra-se posicionado no sentido Norte-Sul, deste modo, o ângulo azimutal da superfície (γ) é -90° para Este e 90° para Oeste.

A avaliação do modelo ambiental e consequentemente da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento do local em estudo é importante para a validação dos resultados subsequentes, uma vez que as condições climatológicas têm grande influência nos resultados obtidos.

Nos gráficos 5.1 e 5.2 observa-se a decomposição da radiação solar nas componentes directa e difusa, em superfície horizontal, durante o solstício de Junho e Dezembro, no local em estudo.

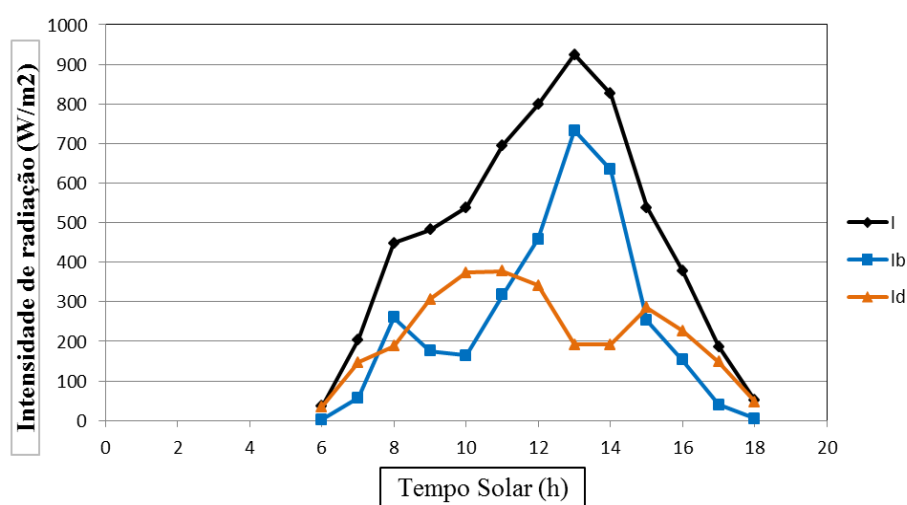


Gráfico 5.1: Decomposição da radiação solar horizontal em Salamansa, durante o solstício de Junho.

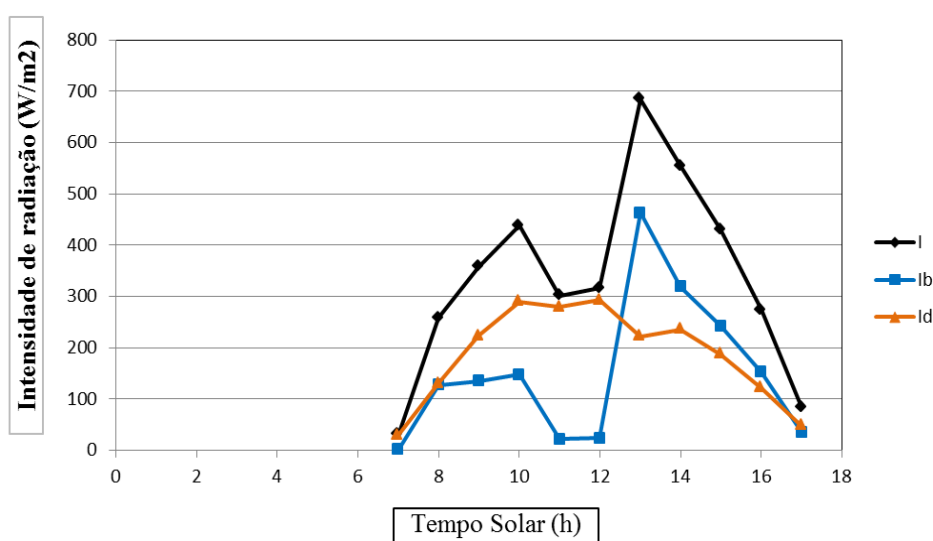


Gráfico 5.2: Decomposição da radiação solar horizontal em Salamansa, durante o solstício de Dezembro.

Pela análise dos gráficos, é possível constatar a diminuição, comparando o Verão (solstício de Junho) com o Inverno (solstício de Dezembro), tanto da quantidade de radiação solar incidente em superfície horizontal, como do número de horas de Sol durante um dia. Há uma diminuição dessas variáveis, no entanto, não é muito pronunciada, devido ao facto de Salamansa se situar numa baixa latitude (16° N), ou seja, próximo do equador, possuindo assim uma tendência de uniformidade da radiação solar entre Dezembro e Junho.

Também é possível verificar, que a radiação total incidente em superfície horizontal no local de estudo durante o solstício de Junho é maioritariamente de carácter direccional, devido a uma maior fracção de radiação directa na sua composição. Uma vez que a componente difusa da radiação é quase igual tanto no Inverno como no Verão, verifica-se que ocorre um aumento considerável da fracção da componente directa do Verão relativamente ao Inverno o que se deve ao k_T . A média do k_T no Verão foi aproximadamente 0,52 enquanto no Inverno foi 0,49. Ou seja, no primeiro caso, 52% da radiação que incide no topo da atmosfera, chega à superfície terrestre enquanto para o segundo caso chega 49%.

Apesar da diferença ser pequena, os resultados confirmam a dependência da cobertura do céu na transmissão da radiação solar global, em que menores valores de k_T têm a ver com maior concentração de nuvens e vapor d'água e vice-versa.

Os gráficos 5.3 e 5.4 apresentam a variação da radiação solar tendo em conta uma inclinação de superfície de 15° sendo o albedo considerado de 0,2. Em ambos os gráficos, pode-se verificar que esta inclinação da superfície favorece a captura de energia no solstício de Junho. Deste modo pode-se constatar que existe uma grande dependência da energia solar colectada com o ângulo da superfície em causa.

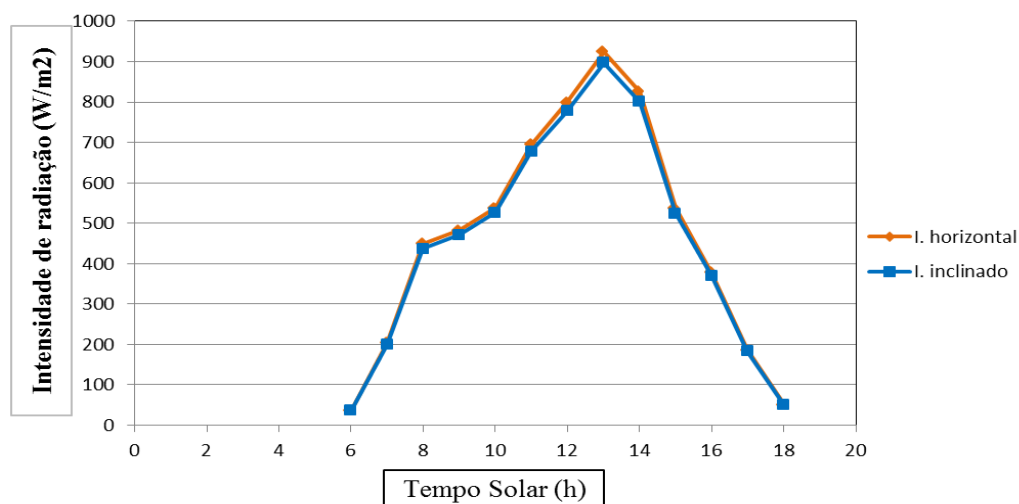


Gráfico 5.3: Comparação da radiação solar total em superfície inclinada em relação à radiação total em superfície horizontal durante o solstício de Junho.

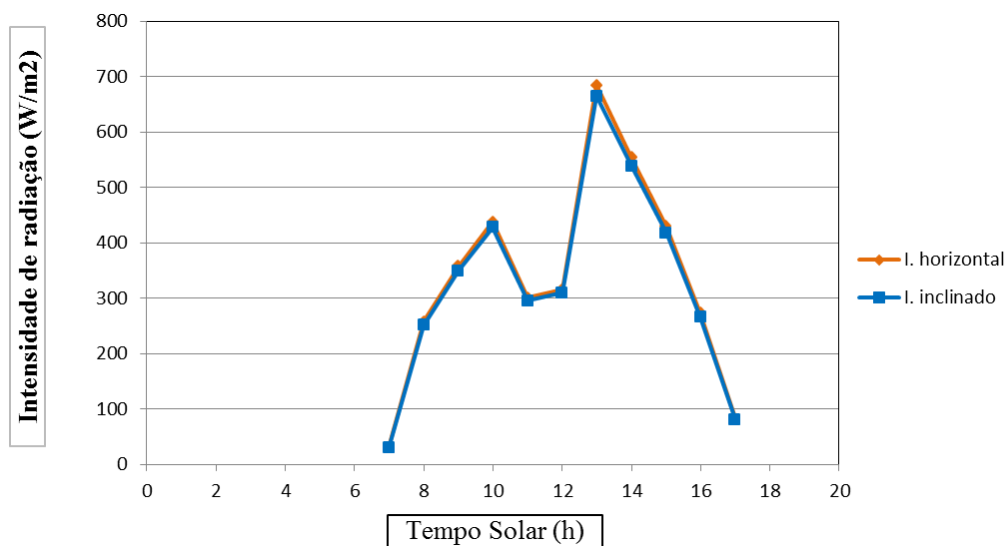


Gráfico 5.4: Comparação da radiação solar total em superfície inclinada em relação à radiação total em superfície horizontal durante o solstício de Dezembro.

O Gráfico 5.5 compara a radiação total em superfície inclinada nos dias específicos em estudo. Como era de esperar, essa radiação é sempre maior no Verão em relação ao Inverno assim como as horas de disposição solar. Apesar dessa diferença pode-se dizer que, tanto no Verão como no Inverno a zona de Salamansa tem grande potencial solar.

Por outro lado, dada a inclinação ser muito pequena e a latitude do local ser próxima do Equador, tanto no solstício de Junho como de Dezembro, a radiação total em superfície inclinada é praticamente igual à radiação total em superfície horizontal.

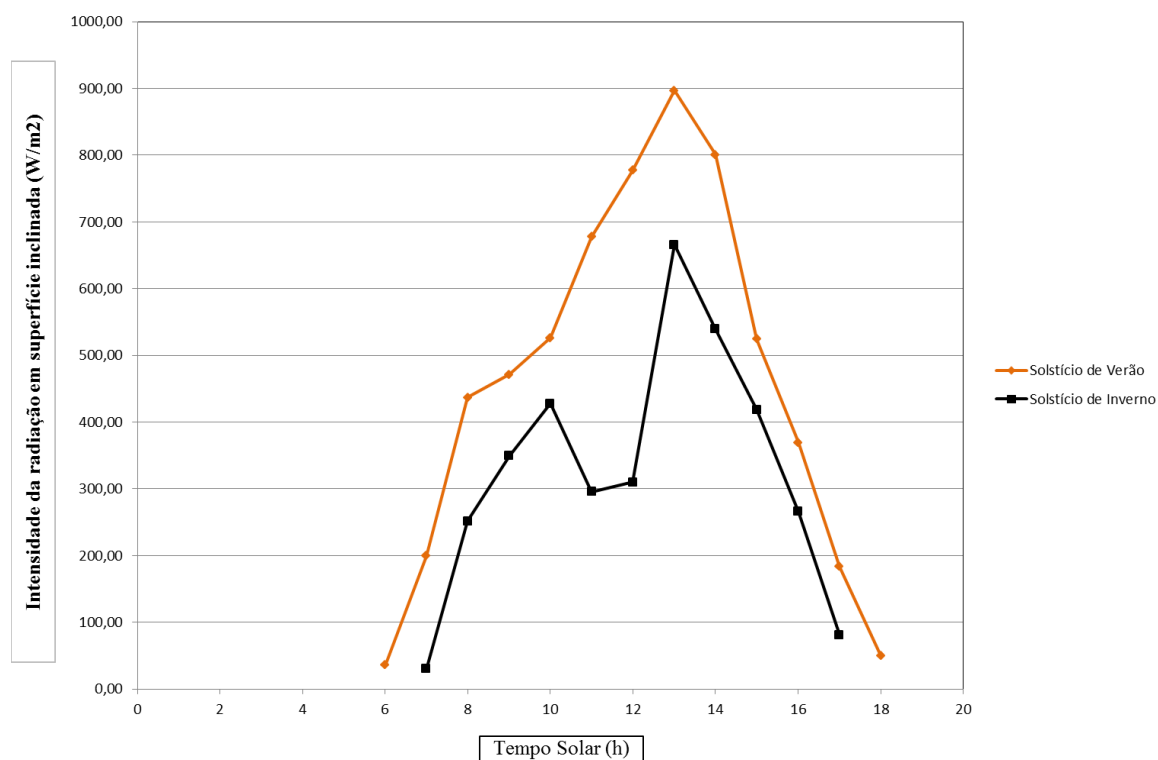


Gráfico 5.5: Comparação da radiação solar total em plano inclinado no solstício de Junho e de Dezembro.

5.2. Destilação solar passiva

Na Tabela 5.3 são listados os valores padrão dos parâmetros usados na simulação deste tipo de instalação.

| Parâmetros | |
|--|------------|
| Comprimento do tanque (m) | 20 |
| Largura do tanque (m) | 3 |
| Inclinação da cobertura (°) | 15 |
| Espessura da cobertura (m) | 0,004 |
| Profundidade do tanque (m) | 0,5 |
| Altura da lâmina de água (m) | 0,02 |
| Absorvidade da cobertura | 0,07 |
| Absorvidade da água do tanque | 0,8 |
| Massa da água (kg) | 1200 |
| Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$) | 5,67E-08 |
| Emissividade da cobertura | 0,9 |
| Emissividade da água | 0,97 |
| Coeficiente de perdas para o solo ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) | 0,5 |
| Calor Latente de Vaporização (J/kg) | 2,3466E+06 |

Tabela 5.3: Valores nominais dos parâmetros usados na simulação do modelo de destilação solar passiva.

Nesta secção serão apresentados os resultados dos balanços energéticos da unidades de destilação solar passiva proposta. Proceder-se-á apenas à avaliação dos parâmetros mais relevantes no desempenho da unidade de destilação.

Os gráficos 5.6 e 5.7 mostram os perfis de temperatura da água do tanque (T_w) e da cobertura (T_c), ao longo dos dias específicos de operação.

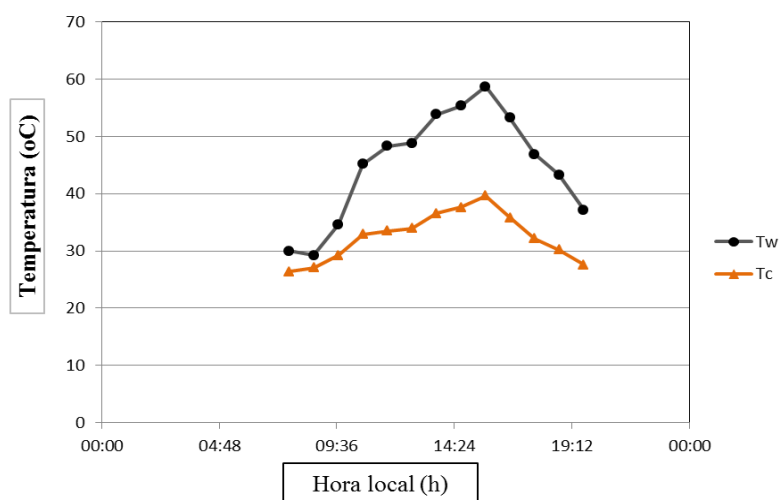


Gráfico 5.6: Variação de T_w e T_c durante o solstício de Junho.

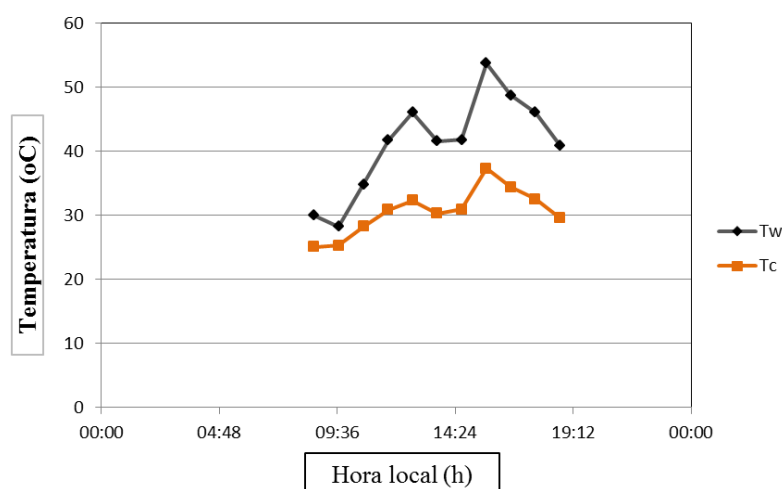


Gráfico 5.7: Variação de T_w e T_c durante o solstício de Dezembro.

Em todos os casos, a temperatura da água é maior que a temperatura da cobertura o que torna possível a ocorrência da destilação da água do mar pois, consegue-se assim atingir a evaporação da mesma. Com isso, pode-se concluir também que, a profundidade do tanque e a altura da lâmina de água são ideais para a unidade em estudo uma vez que a diferença dessas temperaturas depende dos referidos parâmetros.

Por outro lado, ao comparar-se os máximos das temperaturas (água e cobertura), para o local e dias em estudo, verifica-se que todos eles ocorrem à mesma hora, não existindo desfasamento entre eles.

Esses gráficos (5.6 e 5.7) mostram ainda a grande dependência das temperaturas analisadas com a radiação solar. Comparando os dois gráficos (duas datas) é possível constatar a analogia entre a radiação solar e os valores das temperaturas. Tal como ocorria na radiação solar, as temperaturas da água e da cobertura não variam muito entre Junho e Dezembro no local de estudo, devido ao clima equatorial característico desta região.

Os gráficos 5.8 e 5.9 apresentam a variação dos coeficientes de transferência de calor evaporativo (h_{ew}), radiactivo (h_{rw}) e convectivo (h_{cw}) durante os dias em estudo (21 de Junho e 21 de Dezembro).

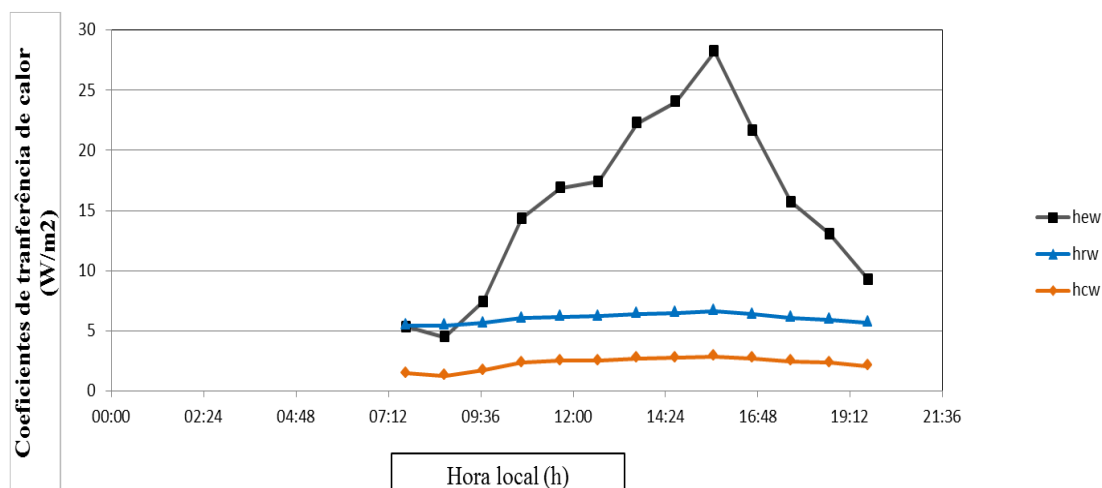


Gráfico 5.8: Variação de h_{ew} , h_{rw} e h_{cw} no solstício de Junho.

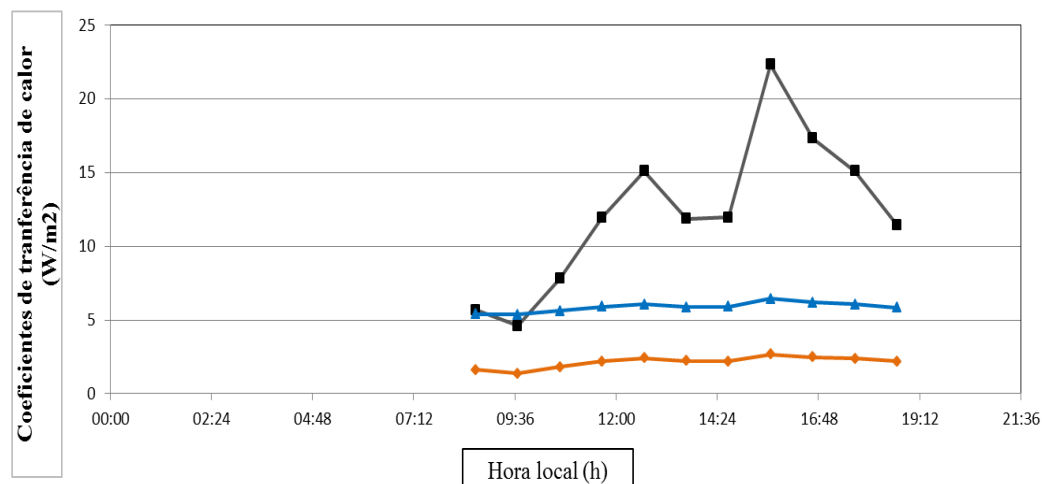


Gráfico 5.9: Variação de h_{ew} , h_{rw} e h_{cw} no solstício de Dezembro.

O coeficiente de transferência de calor evaporativo é maior que os outros coeficientes nos dois casos o que provoca uma maior produção horária de destilado. Esse coeficiente é dependente da velocidade do vento, enquanto o termo da convecção (último termo dos gráficos 5.8 e 5.9) é dependente da temperatura ambiente. De facto, como a temperatura ambiente não excede a temperatura da cobertura, este termo deixa de representar uma perda por convecção e, passa a originar um ganho de calor, fazendo aumentar a temperatura da água do tanque.

O gráfico seguinte apresenta a variação da taxa de produção horária de destilado, nos dias em estudo de operação da unidade.

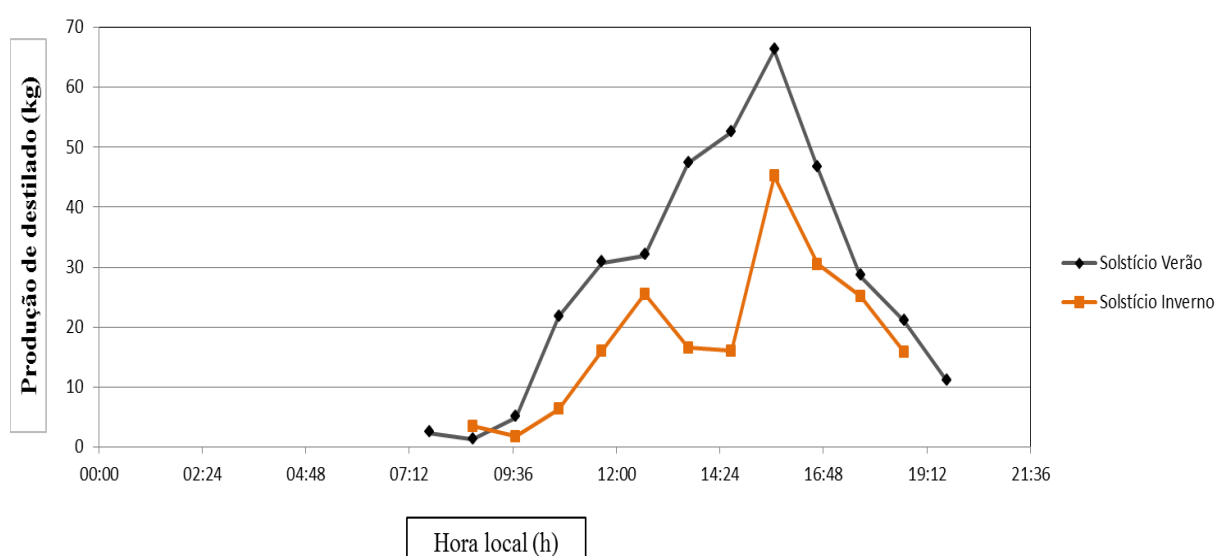


Gráfico 5.10: Variação da taxa de produção horária em $\text{kg/m}^2\text{h}$ para o Verão e o Inverno.

Como já era de esperar a produção de água no Verão é maior que no Inverno uma vez que há mais radiação, as diferenças de temperatura entre a água e a cobertura são maiores para uma mesma profundidade do tanque e altura da lâmina de água a destilar. Pelos resultados verificou-se que no dia 21 de Junho a produção diária de água é aproximadamente 366 litros enquanto no dia 21 de Dezembro é cerca de 202 litros, o que dá uma diferença de 164 litros por dia entre o Verão e o Inverno.

Através dos resultados do inquérito e/ou entrevistas feitas no local e analisadas anteriormente, verificou-se uma predominância de 5 pessoas por agregado familiar e que o caudal médio diário de água doce necessário para abastecer toda a população da zona (1174) seria $10,86 \text{ m}^3$, o que está muito além do volume diário produzido pela unidade em estudo tanto no Inverno como no Verão. Por outro lado, como referido no capítulo anterior, tentar-se-á atender apenas

as necessidades de consumo para abranger um maior número de famílias. Deste modo, pela quantidade diária de água produzida pelo destilador solar proposto, supõe-se que cada família é constituída por 5 agregados e cada agregado necessitaria de 4 litros de água para consumo (beber e cozinhar). Assim poder-se-ia atender as necessidades de aproximadamente 92 pessoas, ou seja, 18 famílias constituídas por 5 agregados no período de maior produção de água (Verão), o que faria uma prezada diferença nas condições actuais da zona.

Considerando que as necessidades para fins alimentares correspondem a 40% das necessidades em água para a população da zona, a quantidade de água necessária para tal seria de aproximadamente 4344 litros. Para produzir este volume de água durante o Verão seria necessário que a área do destilador proposto fosse quase 12 vezes maior, ou seja 356 m². No entanto, tem dias em que há mais e menos disponibilidade da radiação solar havendo assim uma maior e menor produção de água respectivamente. Deste modo, seria fundamental considerar uma área de pelo menos 5% maior, ou seja, 374 m², para haver um maior aproveitamento nos dias com mais disponibilidade da radiação solar resultando assim, uma compensação nos dias em que há menor disponibilidade da radiação solar, ou seja, menor produção de água.

O Gráfico 5.11 mostra a variação da eficiência térmica do destilador para as duas datas em estudo. Como seria de prever, este gráfico segue a evolução do gráfico anterior (Gráfico 5.8), uma vez que a definição de eficiência térmica global dos destiladores solares passivos denende da produção diária.

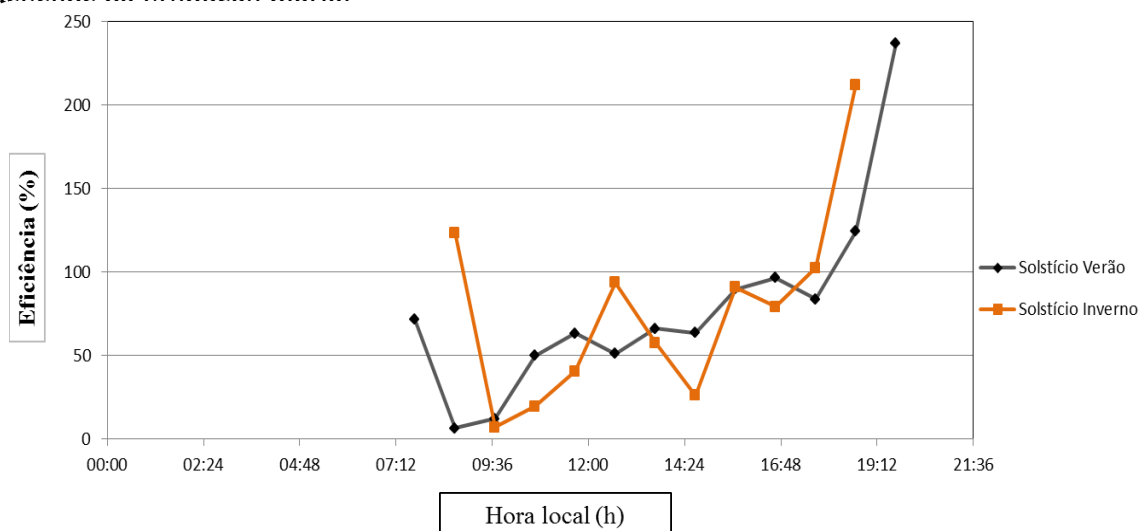


Gráfico 5.11: Variação da eficiência térmica do destilador proposto durante o Verão e o Inverno.

Tanto no Inverno como no Verão, em certas horas o destilador apresenta eficiências superiores a 100% o que se deve à duas razões: no Inverno é superior de manhã porque a temperatura assumida inicialmente para a água é superior à temperatura ambiente; depois do pôr-do-sol, tanto no Verão como no Inverno, nas primeiras horas a temperatura da água é muito superior à da cobertura havendo assim um incremento da produção.

No Verão o destilador em estudo apresenta uma eficiência média diária de aproximadamente 78% enquanto no Inverno é cerca de 77% pois, como foi mencionado anteriormente, esta insignificativa diferença justifica-se pela uniformidade do clima de Salamansa.

Em anexo poderão ser consultados as tabelas decorrentes dos resultados obtidos para todos os parâmetros calculados. Também serão apresentadas as equações do modelo computacional desenvolvido.

6. CONCLUSÕES

Com este trabalho, pretendeu-se dar uma contribuição aos estudos sobre a problemática da escassez de água em Cabo Verde, apontando uma alternativa para complementar o atendimento das necessidades de produção de água dessalinizada, especialmente voltada para comunidades difusas, em grande parte desprovidas ou dependentes de um abastecimento irregular de água, como é o caso de Salamansa.

Nos últimos anos, a empresa responsável pela produção e distribuição de água em Cabo Verde tem implantado sistemas de dessalinização via osmose inversa e tem-se verificado problemas frequentes com parte dos dispositivos instalados o que acaba por suscitar perda e aposta de mais recursos financeiros. Deste modo, procurou-se oferecer uma abordagem tecnológica alternativa, através do emprego da destilação solar, um sistema mais simples e menos dispendioso tecnologicamente.

Com a realização desta dissertação foi possível extrair as seguintes conclusões:

Sobre a destilação solar:

A dessalinização é uma técnica muito avançada, que inclui tecnologias de eficiência comprovada e utilizadas em várias partes do mundo, especialmente para maiores escalas de produção. No entanto, os métodos usualmente empregados não são apropriados para regiões com poucas infra-estruturas ou para regiões descentralizadas por causa de sua necessidade permanente de manutenção qualificada e fornecimento de eletricidade. Nessas regiões, como é o caso de Salamansa, a destilação solar pode vir a tornar-se uma alternativa promissora para um fornecimento regular de água.

- A destilação solar tem a vantagem de aproveitar o potencial de insolação de Salamansa em seu processo tecnológico, com uma energia livre de custos. Isso significa uma grande vantagem em relação a outras tecnologias e pode vir a viabilizar seu emprego na zona em estudo, já que suas exigências vão ao encontro das características naturais dessa zona.

- O maior custo da destilação solar está no preço inicial elevado. No entanto, em termos operacionais, os seus custos são significativamente menores em relação a outras tecnologias, nas quais a manutenção e a operação são mais complexas e requerem trabalhadores especializados.

- Por ser uma tecnologia simples, que imita o ciclo natural da água em uma escala menor, é uma tecnologia de fácil entendimento e assimilação por parte dos utilizadores, o que pode contribuir para o emprego de mão-de-obra local na sua operação e manutenção, já que em Salamansa não há grande disponibilidade de mão-de-obra qualificada pelo histórico déficit educacional da zona. Isso pode trazer benefícios significativos, se comparado com outros sistemas, nos quais erros de operação podem danificá-los e até inutilizá-los (especialmente, em sistemas com membranas), aumentando os custos consideravelmente.

Sobre o software utilizado:

- Foi possível observar que a modelação, realizada através do EES, traz grandes vantagens, não só pela possibilidade de se poder simular com relativa facilidade qualquer outra unidade de destilação solar, mas também pela simplicidade na resolução das equações diferenciais dos balanços de energia assim como, a grande facilidade de se efectuar diversos tipos de análises.

Sobre o modelo ambiental:

Pela análise dos gráficos, constatou-se a diminuição, comparando o Verão (solstício de Junho) com o Inverno (solstício de Dezembro), tanto da quantidade de radiação solar incidente em superfície horizontal, como do número de horas de Sol durante um dia embora não muito pronunciada pois, Salamansa situa-se próximo do equador, possuindo assim uma tendência de uniformidade da radiação solar entre Dezembro e Junho.

Dada a inclinação ser muito pequena e a latitude do local ser próxima do Equador, tanto no solstício de Junho como de Dezembro, a radiação total em superfície inclinada é praticamente igual à radiação total em superfície horizontal. Desta forma, poder-se-ia utilizar os dados da radiação em superfície horizontal em vez de, através deles, calcular a radiação total em superfície inclinada já que a diferença entre elas é muito pequena.

Sobre o destilador solar passiva proposto:

Como já era de esperar a produção de água no Verão é maior que no Inverno uma vez que há mais radiação disponível, as diferenças de temperatura entre a água e a cobertura são maiores para uma mesma profundidade do tanque e altura da lâmina de água a destilar.

O projecto do destilador solar proposto poderá atender as necessidades de água doce para consumo de 18 famílias constituídas por 5 agregados (92 pessoas). Isso diminuirá a dependência de um abastecimento irregular através de soluções paliativas e emergenciais.

Para satisfazer as necessidades para fins alimentares de toda a população da zona seria necessário produzir cerca de 4344 litros de água e o destilador, nestas circunstâncias, teria uma área de aproximadamente 374 m².

Pode-se dizer que, para confirmar os resultados obtidos e verificar a veracidade do modelo em campo, o destilador proposto de 30 m² serviria como protótipo para simular as verificações técnicas e, também, a questão económica, sabendo assim a sua rentabilidade.

No Verão o destilador em estudo apresenta uma eficiência média diária de aproximadamente 78% enquanto no Inverno é cerca de 77%.

7. SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

O abastecimento regular de água potável tem sido, historicamente, uma necessidade de ordem social, ambiental e económica, muitas vezes indevidamente atendida. Esse estudo procurou apontar uma alternativa que envolve o desenvolvimento e/ou a melhoria de processos para complementar o atendimento dessa necessidade. No entanto, devido à complexidade e magnitude do problema, a continuidade dos estudos ainda se é fundamental para que essa necessidade seja suprida e, assim, possa haver uma melhora significativa na qualidade de vida da população da zona.

Como em nenhum estudo é possível abranger todos os aspectos que envolvem o desenvolvimento e/ou a melhoria de processos, são sugeridos alguns novos estudos visando a implementação futura de um dispositivo deste em campo.

- Aspectos educativos:

Informações sobre a dessalinização poderiam ser incluídas na educação da comunidade local para se criar e difundir uma preocupação e interesse entre a população sobre o desafio da escassez de água, consciencializando as pessoas de que essa é uma alternativa real para o tratamento de água. Também é importante ajudar e treinar os membros da comunidade a operar e manter as instalações, pois essa é uma das principais razões de fracasso de experiências anteriores.

Por outro lado, poder-se-ia fazer associações com outros programas de energias renováveis, meio ambiente e saúde pública, pois dessa maneira seria mais fácil estabelecer uma infraestrutura básica, incluindo organizações não-governamentais (ONGs), universidades, escolas e governos.

- Aspecto económico:

Dever-se-ia fazer uma análise económica para estimação do custo do dispositivo de dessalinização proposto e da água produzida pelo mesmo.

- Aspectos técnicos:

Há a necessidade de dados experimentais para complementar este estudo. Um dispositivo de dessalinização, em escala experimental, precisa ser instalado para avaliação dos aspectos

abordados e para levantar possíveis informações importantes sobre os demais aspectos que envolvem a dessalinização de água, que não foram incluídos nesse estudo propedêutico.

Usando o mesmo ambiente de simulação, será possível estudar-se outro tipo de configurações e novas patentes de instalações de destilação solar, sempre numa perspectiva de otimização e de crescimento tanto da produção como da respectiva eficiência de forma a atender não só as necessidades de consumo para fins alimentares como também as necessidades de higiene.

Além do estudo de outras instalações, também seria interessante e viável simular o uso de diversas técnicas para aumentar a eficiência do modelo aqui estudado, como por exemplo, a simulação da adição de corantes e materiais absorventes (cascalho, borracha, carvão) à água do tanque, que aumentem a massa de acumulação, assim se conseguindo armazenar maior quantidade de energia térmica.

Poder-se-ia ainda aplicar uma técnica que consiste no aquecimento de apenas uma pequena camada superior de água do tanque usando um arranjo de duas fileiras alternadas de tubos de alumínio pretos com água destilada no seu interior. Cada fileira serviria para separar a camada superior de água da camada inferior. A radiação solar seria recebida pela fileira separadora de cima e, uma porção dessa radiação seria usada no aquecimento do topo da camada de água. A restante porção da radiação solar seria recebida pela fileira separadora de baixo e usada para aquecer a camada superior e a camada inferior a esta fileira, armazenando energia. Cada tubo seria disposto segundo o comprimento do tanque, como se pode verificar na Figura 7.1. Por outro lado, para a aplicação desta técnica seria necessário aumentar o volume de água no tanque. No entanto, a espessura ideal da camada superior de água à cada fileira seria 2 cm. Também poder-se-ia usar reflectores que interceptam e concentram a radiação solar para produzir altas temperaturas no interior do tanque. Ou então, bolas de alumínio pretas e ocas para permitirem a sua flutuação e absorver a radiação solar e transmiti-la à água.

A Figura 7.1 concentra alguns aspectos técnicos sugeridos anteriormente que poderiam ser aplicados futuramente para aumentar a eficiência do sistema.

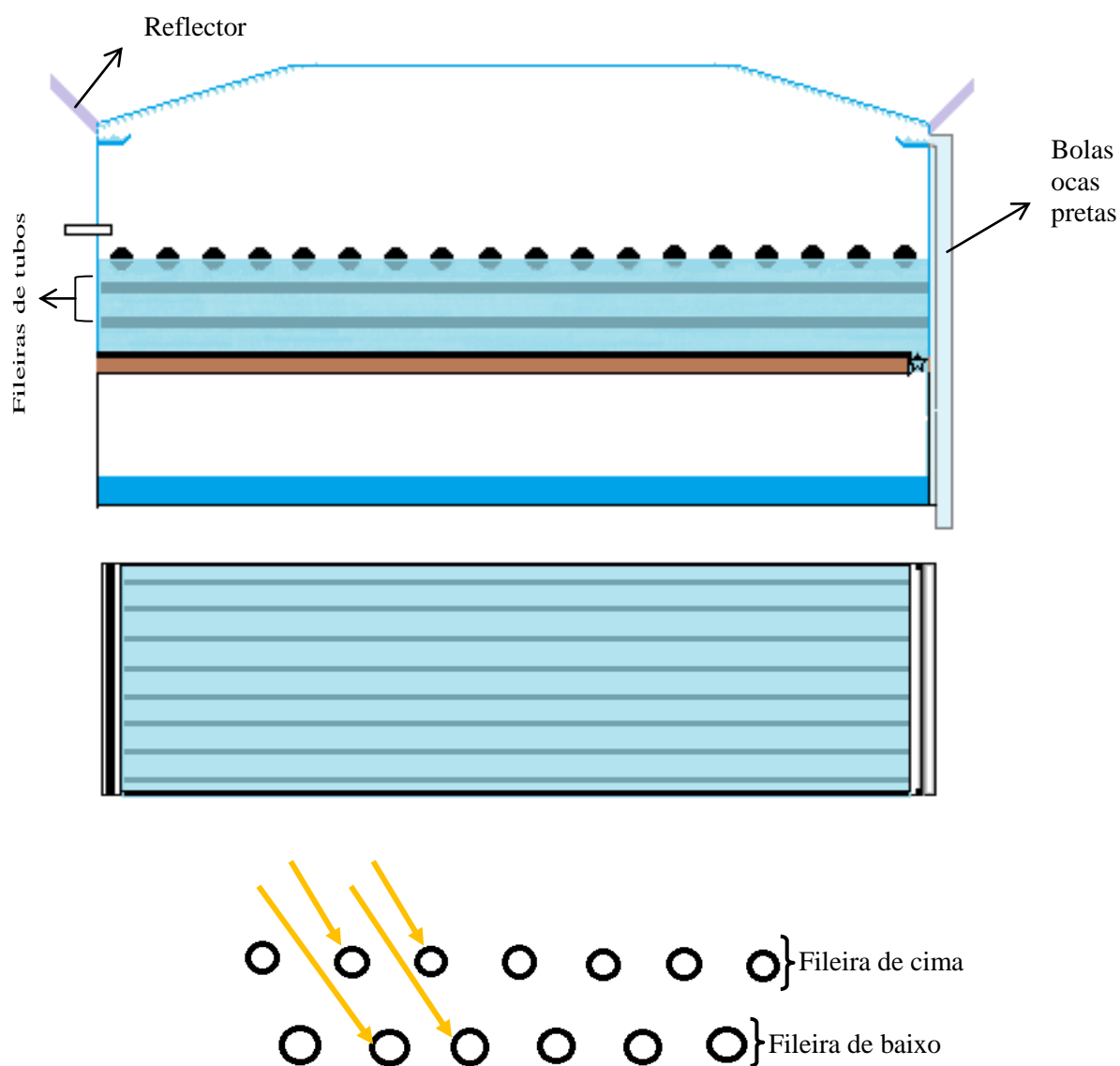


Figura 7.1: Configuração de um possível destilador solar (vista de frente) em cima; tanque de água a destilar (vista de cima) no meio; Alternância das fileiras de tubos de alumínio pretos.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Santos, M., Rocha, C. (2009). “Relatório Final Consultoria Nacional de Cabo Verde”. Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, Projecto de Cooperação Técnica TCP - CPLP/FAO (107 páginas). Formulação de um Programa para a implementação da Convenção das Nações Unidas de Combate a Desertificação – UNCCD nos países da CPLP. Cabo Verde, Outubro de 2009.
- [2] Garmendia, C., Benitez, D. (2010). As Infra-estruturas em Cabo Verde: Uma perspectiva Continental. Relatório Nacional “Africa Infrastructure Country Diagnostic” - 35 páginas. Washington, Agosto de 2010.
- [3] Monteiro, A. D. (2012). O Impacto das Energias Renováveis na Economia dos Países Emergentes – O Caso de Cabo Verde. Dissertação de mestrado em Gestão de Empresas (91 páginas). Instituto Universitário de Lisboa, ISCTE-IUL.Lisboa, 2012.
Disponível em: <http://hdl.handle.net/10071/3389> - Acesso em: 12 Dezembro 2011.
- [4] Gominho, M. F. A. (2010). Gestão dos Recursos Hídricos no Processo de Desenvolvimento Sustentável de Cabo Verde: uma proposta - Projecto de Mestrado em Gestão de Empresas (114 páginas). ISCTE, Business School, Instituto Universitário de Lisboa, Departamento de Gestão. Lisboa, Setembro de 2010.
- [5] Lima, L., Martins, F. (2009) “Os Desafios da Gestão Costeira em Cabo Verde”. Artigo (10 páginas) apresentado no Congresso Cabo Verde – Redes e Desenvolvimento Regional correspondente ao 2º Congresso Lusófono de Ciência Regional em conjugação com o 1º Congresso de Ciência Regional de Cabo Verde, com o 15º Congresso da Associação Portuguesa de Desenvolvimento Regional e com o 3º Congresso de Gestão e Conservação da Natureza. Praia, Julho de 2009.
Disponível em:
<http://www.apdr.pt/congresso/2009/temas.html> (divulgação do Congresso);
<http://www.apdr.pt/congresso/2009/pdf/Sess%C3%A3o%201/260A.pdf> (apresentação do artigo). Acesso em: 23 de Dezembro 2011.
- [6] Laranjeira, C. P. F. (2010). Estudo Numérico dos Escoamentos em Canais de Dessalinização por Osmose. Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil (110 páginas). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharias. Outubro de 2010.
- [7] Andrade, E., Bezerra, L., Antunes, F. (2008). Sistema autónomo sem baterias para dessalinização de água salobra - 9 páginas. Universidade Federal do Ceará. Brasil, 2008.
- [8] Ministério do Ambiente, Agricultura e Pescas (2004). Plano de Acção Nacional para o Ambiente (PANA II), Cabo Verde 2004-2014 - Documento Síntese (37 páginas). Praia, Março de 2004.
Disponível em: http://www.sia.cv/documentos/sintese_pt.pdf - Acesso em: 27 Dezembro de 2011.
- [9] Clayton, R. (2006). Desalination for Water Supply FR/R0013 (35p), Review of Current Knowledge, Foundation for Water Research, U.K, Feb. 2006.

[10] Pereira, J. S. J. (2005). Dessalinização de água do mar no litoral nordestino e influência da transposição de água na vazão do rio de São Francisco (11 páginas). Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa. Brasil, Fevereiro de 2005.

[11] Instituto Nacional de Estatística, Censo 2010. Dados Estatísticos – População e Condições de Vida: <http://www.ine.cv/dadostats/dados.aspx?d=1> – Acesso em 3 de Janeiro de 2012.

[12] - Evolução da população residente em Cabo Verde, 1900 -2010:
<http://www.ine.cv/actualise/dadostat/files/7ba5fbd5-bf0a-4faf-a734-0495ba9f80f0evolu%C3%A7%C3%A3o%20da%20popula%C3%A7%C3%A3o%20residente%20em%20cabo%20verde,%201900%20-2010.pdf>
Acesso em: 3 de Janeiro de 2012.

[13] - Agregados segundo a Principal Fonte de Abastecimento de Água:
<http://www.ine.cv/actualise/dadostat/files/62b727ec-8d02-4553-99ce-0f14529251c7agregados%20segundo%20a%20principal%20fonte%20de%20abastecimento%20de%20%C3%A1gua,%202010.pdf>
Acesso em: 3 de Janeiro de 2012.

[14] Índice da Incidência da pobreza em Cabo Verde:
<http://www.ine.cv/decrp/show.aspx?i=17&g=1> - Acesso em: 3 de Janeiro de 2012.

[15] Oliveira, L., Novo, M., Terceiro, A. (2010). Água, ecossistemas aquáticos e actividade humana. Uma abordagem integrada e participativa na definição de estratégias inovadoras e prospectivas de gestão integrada de recursos hídricos no sul de Portugal – PROWATERMAN. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Águas Subterrâneas. Segundo relatório temático, Referência n.º PTDC/AAC-AMB/105061/2008, 110 páginas. Lisboa, Setembro de 2010.

[16] Ministério do Ambiente Agricultura e Pescas (2004). Livro Branco sobre o Estado do Ambiente em Cabo Verde (228 páginas). Direcção Geral do Ambiente. Cabo Verde, Dezembro de 2004.

[17] Dados facultados pelo INE referentes especificamente à zona de Salamansa em relação à população e as suas condições de vida.

[18] Ministério da Economia, Crescimento e Competitividade (2008). Política Energética de Cabo Verde (24 páginas). Praia, Cabo Verde, Junho de 2008.

[19] ELECTRA SARL, Relatório e Contas 2010: Uma aposta nas Energias Renováveis (118 páginas). Publicado no Boletim de Bolsa, N.º 38, Edição da Bolsa de Valores de Cabo Verde, Achada Santo António, Julho de 2011.
Disponível em: <http://www.electra.cv/index.php/Relatorios/View-category.html>
Acesso em: 14 de Janeiro de 2012.

[20] Kobiyama, M., Checchia, T., Silva, R. (2004). Tecnologias Alternativas para Aproveitamento de Águas (115 páginas). Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, 2004.

[21] Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – Consolidação dos Estudos Ambientais. Capítulo 3: Análise de Alternativas Tecnológicas, Páginas 11 – 15.

Disponível em:

http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Recursos%20Hidricos/Integra%C3%A7%C3%A3o%20S%C3%A3o%20Francisco/EIA/Textos/EIA%20Consolidado%20Item%203%20An%C3%A1lise%20das%20Alternativas.pdf - Acesso em: 17 de Janeiro de 2012.

[22] Vilar, D. (2011). Case Study - Cape Verde Islands and ECREEE Regional Approach. Accelerated Renewable Energy Deployment in Islands with Emphasis on the Pacific Islands. IRENA Workshop, 31 páginas. Sydney, October 2011.

[23] Mapa de Cabo verde:

http://www.ipim.gov.mo/worldwide_partner_detail.php?tid=3434&type_id=449 - Acesso em: 21 de Janeiro de 2012.

[24] Duarte, N. (2010). Requalificação Urbana e Infraestruturas Hidráulicas. Artigo publicado na “MALHA URBANA Nº 9 – 2010” (página 119 à 134), Requalificação Urbana e Infraestruturas Hidráulicas.

Disponível em: <http://recil.grupolusofona.pt/jspui/bitstream/10437/2272/1/1333.pdf> - Acesso em: 24 de Janeiro de 2012.

[25] Google Earth – Imagem da vila de Salamansa:

http://maps.google.pt/maps?hl=pt-PT&biw=1138&bih=535&q=salamansa&gs_upl=412716464101747119191010101013751246810.3.31910&bav=on.2,or_r_gc_r_pw.,cf.osb&um=1&ie=UTF-8&ei=a-MaT-ibFYLEswaV3KxI&sa=X&oi=mode_link&ct=mode&cd=3&ved=0CBIQ_AUoAg - Acesso em: 29 de Janeiro de 2012.

[26] Google Maps: Ilha de São Vicente.:

http://maps.google.pt/maps?hl=pt-PT&biw=1138&bih=535&q=salamansa&gs_upl=412716464101747119191010101013751246810.3.31910&bav=on.2,or_r_gc_r_pw.,cf.osb&um=1&ie=UTF-8&ei=a-MaT-ibFYLEswaV3KxI&sa=X&oi=mode_link&ct=mode&cd=3&ved=0CBIQ_AUoAg - Acesso 29 de Janeiro de 2012.

[27] Pereira, D. C. F. (2007). Detecção de subprodutos da desinfecção com cloro em água dessalinizada. Dissertação para Mestrado em Química, 139 páginas. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, 2007.

[28] Miller, J. E. (2003). Review of Water Resources and Desalination Technologies (54 pages). Materials Chemistry Department, Sandia National Laboratories. Albuquerque, March 2003.

- [29] Madaeni, S. S. (1999). The application of membrane technology for water disinfection. Chemical Engineering Department, Razi University. Water Research 33, 301-308.
- [30] Alves, C. (2007). Tratamento de águas de abastecimento, 2ª Edição, Publindústria, 301-320.
- [31] Pinho, M. Â. (2009). Meio de cultivo a base de concentrado de dessalinização obtido por osmose inversa para *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Alimentos (85 páginas). Florianópolis, 2009.
- [32] Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional - Consolidação dos Estudos Ambientais. Capítulo 3: Análise das Alternativas - análise de Alternativas Tecnológicas (70 páginas).
Disponível em:
http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Recursos%20Hidricos/Integra%C3%A7%C3%A3o%20S%C3%A3o%20Francisco/EIA/Textos/EIA%20Consolidado%20Item%203%20An%C3%A1lise%20das%20Alternativas.pdf – Acesso em: 15 de Fevereiro de 2012.
- [33] Revista INICIATIVA – Empresas & Negócios de Cabo Verde. Edição Nº 37, Julho-Agosto 2011.
- [34] Cometta, E. Energia Solar – Utilização e empregos práticos (128 páginas). Copyright 1978 by Hemus – Livraria Editora Ltda, São Paulo.
- [35] Jorge, B. (2001). Simulação de processos de destilação solar de água salgada. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica (118 páginas). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2011.
- [36] Costa, C. G. (2008). Destilação Solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Química Analítica (106 páginas). Universidade de Brasília – Instituto de Química, Agosto de 2008.
- [37] Cabinet Merlin Ingénieurs Conseils & Ingénieurs Conseils et Economistes Associes (ICEA) (2010). Project de Renforcement de Systemes de Production D'Éau Dessale sur les îles de São Vicente et Sal – Republique du Cap Vert (32 pages). Etude de Faisabilite, Memoire – Phase 2 Partie 2.1 Analyse Institutionnelle, Groupe Merlin / REF DOC : 193326 - 102 -ETU -ME – 003 IND A . LE 18/08/10.
- [38] Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde - Gabinete do Recenseamento Geral da População e Habitação (2010). Apresentação dos resultados preliminares do IV Recenseamento Geral da População e Habitação, 2010 (RGPH - 2010) – 15 páginas. Praia, Setembro de 2010.
- [39] Instituto Nacional de Estatística - Gabinete do Censo 2010 (2010). Apresentação de dados Preliminares do IVº RGPH 2010 (18 páginas). Praia – Cabo Verde, Setembro 2010.
- [40] Neves, A. Estudo de Impacte Ambiental, Central Dessalinizadora – Mindelo, Ilha de São Vicente (84 páginas). São Vicente – Cabo Verde.

[41] Diagnóstico socioeconómico da comunidade de Salamansa [INDP]

[42] San Juan, J. A. M. (2000). Desalación aguas salobres y de mar - Osmosis Inversa (395 páginas). Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 84-7114-849-8. Madrid, 2000.

[43] Silva, M. D. P. (2005). Caracterização Ambiental e Proposta de Gestão Integrada Para o Litoral da Cidade do Mindelo (S. Vicente - Cabo Verde). Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos (148 páginas). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Caparica, Setembro 2005.

[44] Fernandes, E. (2011). Os Problemas Ambientais em Cabo Verde: Políticas e Medidas de Protecção Ambiental - Estudo do Caso Comparativo “Praia Vs São Salvador do Mundo”. Dissertação de Mestrado em Ciência Política e Relações Internacionais, Especialização Globalização e Ambiente (166 páginas). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas (FCSH). Lisboa, Julho de 2011.

[45] Maluf, A. P. (2005). Destiladores Solares no Brasil. Monografia para a obtenção do título de especialista em Fontes Alternativas de Energia (39 páginas). Minas-Gerais – Brasil, 2005.

[46] Karagiannis, I.C. and Soldatos, P.G. (2008). “Water desalination cost literature: review and assessment”; Desalination, 223, pp. 448-456. Agricultural University of Athens, Department of Agricultural Economics & Rural Development, 2008.

[47] CCM - Portal Montemuro, “ONU alerta para a necessidade de uma gestão racional da água”, 2002. Disponível em:
http://www.montemuro.org/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=261&Itemid=2 - Acesso em 17 de Abril de 2012.

[48] Pinho, M.Â. (2009). “Meio de cultivo a base de concentrado de dessalinização obtido por osmose inversa para *Arthrospira* (Spirulina) *platensis*”. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Alimentos (85 páginas). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Florianópolis, 2009.

[49] PAGIRE I

Disponível em: <http://silusba2.wordpress.com/category/portugal/> - Acesso em: 23 de Abril de 2012.

[50] Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG) em São Vicente - Estação Meteorológica Automática do Mindelo (Observatório do Mindelo) – Direcção de Análise e Estudos.

[51] Gonçalves, A. F. F. (2008). Soluções de Saneamento Aplicadas a Populações de Países em Vias de Desenvolvimento, Caso de Estudo Mindelo – Cabo Verde. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para

obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil Engenharia Sanitária (193 páginas). Monte da Caparica, Maio de 2008.

[52] Guerreiro, M. L. F. B. (2009). Dessalinização para produção de água potável - Perspectivas para Portugal. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica (80 páginas). Universidade do Porto, Julho de 2009.

[53] Duffie, J., & Beckman, W. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes (2.^a ed.) - New York: John Wiley and Sons.

[54] Formoso, S. C. (2010). Sistema de tratamento de água salobra: alternativa de combate à escassez hídrica no semi-árido sergipano. Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente (137 páginas). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – Brasil, Fevereiro de 2010.

[55] Murugavel, K. K., Chockalingam, Kn. K. S. K., & Srithar, K. (2008). Progresses in Improving the Effectiveness of the Single Basin Passive Solar Still. *Desalination*, 220, 677-686.

[56] Singh, H. N., & Tiwari, G. N. (2004). Monthly Performance of Passive and Active Solar Stills for Different Indian Climatic Conditions. *Desalination*, 168, 145-150.

[57] Ghoneyem, A., & Ileri, A. (1997). Software to Analyze Solar Stills and an Experimental Study on the Effects of the Cover. *Desalination*, 114, 37-44.

[58] Zurigat, Y. H., & Abu-Arabi, M. K. (2004). Modeling and Performance Analysis of a Regenerative Solar Desalination Unit. *Applied Thermal Engineering*, 24, 1061-1072.
<http://www.temperatureweather.com/> - Acesso em 7 Junho de 2012.

[59] Tiwari, G. N., Madhuri, & Garg, H. P. (1985). Effect of Water Flow over the Glass Cover of a Single Basin Solar Still with an Intermittent Flow of Waste Hot Water in The Basin. *Energy Conversion and Management*, 25, 315-322.

[60] Tiwari, A. K., & Tiwari, G. N. (2006). Effect of Water Depths on Heat and Mass Transfer in a Passive Solar Still: In Summer Climatic Condition. *Desalination*, 195, 78-94.

[61] Tiwari, A. K., & Tiwari, G. N. (2007). Thermal Modeling Based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still: The Effect of Water Depths. *Desalination*, 207, 184-204.

[62] Abu-Hijleh, B. A. K. (1996). Enhanced Solar Still Performance Using Water Film Cooling of the Glass Cover. *Desalination*, 107, 235-244.

[63] Tripathi, R., & Tiwari, G. N. (2006). Thermal Modeling of Passive and Active Solar Stills for Different Depths of Water by Using the Concept of Solar Fraction. *Solar Energy*, 80, 956-967.

[64] Tiwari, G. N., Dimri, V, & Chel, A. (2009). Parametric Study of an Active and Passive Solar Distillation System: Energy and Exergy Analysis. *Desalination*, 242, 1-18.

- [65] Murugavel, K. K., Chockalingam, Kn. K. S. K., & Srithar, K. (2008). Progresses in Improving the Effectiveness of the Single Basin Passive Solar Still. *Desalination*, 220, 677-686.
- [66] Akash, B. A., Mohsen, M. S., Osta, O., & Elayan, Y. (1998). Experimental Evaluation of a Single-Basin Solar Still Using Different Absorbing Materials. *Renewable Energy*, 14, 307-310
- [67] Madani, A. A., & Zaki, G. M. (1995). Yield of Solar Stills with Porous Basins. *Applied Energy*, 52, 273-281.
- [68] Abdel-Rehim, Z., & Lasheen, A. (2005). Improving the Performance of Solar Desalination Systems. *Renewable Energy*, 30, 1955-1971.
- [69] Rai, S. N., & Tiwari, G. N. (1982). Single Basin Solar Still Coupled with Flat Plate Collector. *Journal of Energy Conversion and Management*, 23, 145-150.
- [70] Tleimat, B., & Tleimat, M. (1993). Developments in Saline Water Distillation Technology. *Desalination*, 93, 293-296.
- [71] Tiwari, G. N., Singh, H. N., & Tripathi, R. (2003). Present Status of Solar Distillation. *Solar Energy*, 75, 367-373.
- [72] Fotografias retiradas no local de estudo (no dia em que foi feito o inquérito).
- [73] Panchal, H.N., Shah, P.K. (2011). Effect of Varying Glass cover thickness on Performance of Solar still: in a Winter Climate Conditions. *International Journal Of Renewable Energy Research (IJRER)*, Vol.1, No.4, pp.212-223, 2011.
- [74] Pianezzola, G. (2006). Mapas de complementaridade dos potenciais solar e eólico no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia (96 páginas). Porto Alegre, Julho de 2006.
- [75] Klein, S.A. E E S - Engineering Equation Solver for Microsoft Windows, Operating Systems (345 pages). Commercial and Professional Versions (V9.146), Copyright 1992-2012.
- [76] Ferreira, F. A. (2002). Manual: Noções Básicas do EES (30 páginas). Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, Junho de 2002.
- [77] Histórico do tempo da cidade do Mindelo: <http://www.wunderground.com/history/> - Acesso em: 28 de Agosto de 2012.
- [78] Moraes, J. L. (2009). Sistemas Fotovoltaicos – da Teoria à Prática (125 páginas). ISBN 978-989-96101-0-1, Março de 2009.
- [79] Dias, P. M. D. (2009). Indicadores do potencial de aproveitamento de recursos energéticos endógenos em edifícios residenciais. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia (125 páginas). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Fevereiro de 2009.

[80] Pereira, P.T.S. (2010). Energia Solar Térmica: Perspectivas do Presente e do Futuro. Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores (115 páginas). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Janeiro de 2010.

[81] Severo, T. C. (2005). Desenvolvimento do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático HELIUS para Sistemas Autônomos. Dissertação para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais (125 páginas). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Janeiro de 2005.

[82] Cannio, M., Hanusková, M. Os materiais refractários. Pesquisa & Desenvolvimento – Cerâmicainformação, Março/Abril nº 63. Disponível em:
<http://pt.scribd.com/doc/47679288/Os-materiais-refratarios> - Acesso em: 13 de Setembro de 2012.

[83] Produtos Tijolos Refratários:
<http://www.construtelhas.com.br/produtos/id/34/6/20/pg/1/Macico+Refratario+51.html#paginas> - Acesso em: 13 de Setembro de 2012.

[84] Siqueira, D. F. (2009). Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química (143 páginas). Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química. Uberlândia – MG, Março de 2009.

[85] Dunkle, R. V. (1961). Solar Water Distillation, the Roof Type Solar Still and Multiple Effect Diffusion Still. Developments in Heat Transfer, ASME, Proceedings of the International Heat Transfer, Part V, University of Colorado, Vol. 895
<http://pt.scribd.com/doc/59936803/Solar-Water-Distillation-The-Roof-Type-Still-and-a-Multiple-Effect-Diffusion-Still-1-1> - Acesso em: 21 de Setembro de 2012.

[86] Entrevistas feitas à ELECTRA S.A e a Câmara Municipal de São Vicente.

Anexos

ANEXO I

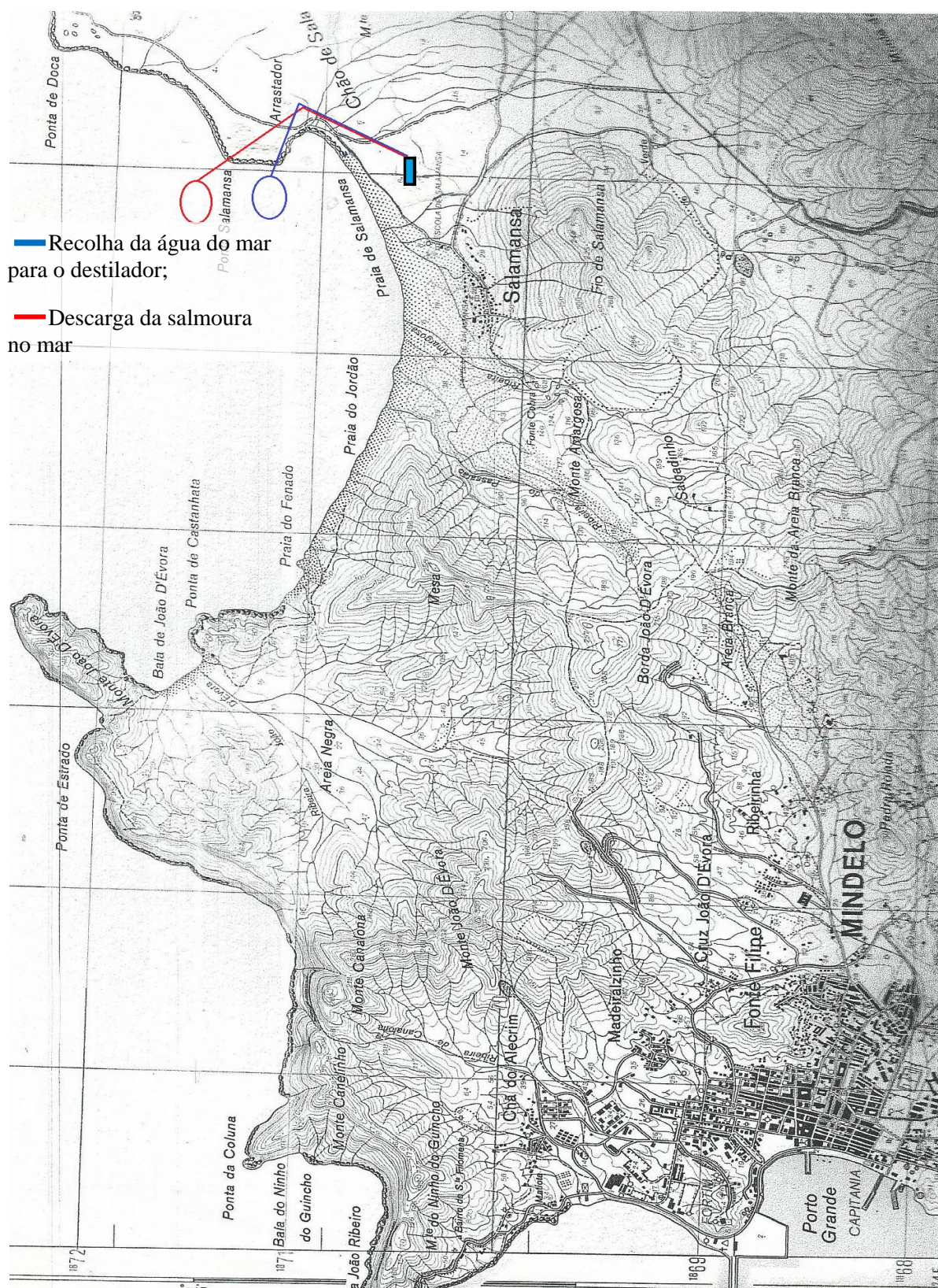


Figura I.1: Localização do destilador proposto no local de estudo. Carta de São Vicente facultado pela Electra de São Vicente.

Cálculo da radiação solar total em superfície inclinada para as datas em estudo:

PROCEDURE I_difuso (k; Rad:I_d)

IF (k<0,35) THEN I_d:= (1-0,249*k)*Rad
IF (k>=0,35) AND (k<=0,75) THEN I_d:=(1,557-1,84*k)*Rad
IF (k>0,75) THEN I_d:=0,177*Rad

END

"Dia do ano = 21 de Junho"

n = 172

"Dia do ano = 21 de Dezembro"

n = 355

"Inclinação da superfície"

beta = 15 [deg]

"Latitude do local"

phi = 16,903867 [deg]

"Ângulo horário"

omega = (T_s-12)*(360/24)

"Ângulo azimutal para Este"

gamma = -90 [deg]

"Ângulo azimutal para Oeste"

gamma = 90 [deg]

"Constante solar"

G_sc = 1353 [W/m²]

"Cálculo da declinação solar"

delta = 23,45 * sin(360*(284+n)/365)

"Radiação extraterrestre em superfície horizontal"

G_0 = (G_sc*(1+0,033*cos((360*n)/365))*(cos(phi)*cos(delta)*cos(omega)+sin(phi)*sin(delta)))

"Índice de transparência"

k_T = I/G_0

"Ângulo de incidência"

cos(theta) = sin(delta)*sin(phi)*cos(beta)-

sin(delta)*cos(phi)*sin(beta)*cos(gamma)+cos(delta)*cos(phi)*cos(beta)*cos(omega)+cos(delta)*sin(phi)*sin(beta)*cos(gamma)*cos(omega)+cos(delta)*sin(beta)*sin(gamma)*sin(omega)

{cos(theta)=(1-cos²(delta)*sin²(omega))^(1/2)}

"Ângulo do Zenital"

cos(theta_z) = cos(phi)*cos(delta)*cos(omega)+sin(phi)*sin(delta)

"Radiação difusa "

CALL I_difuso (k_T;I:I_d)

"Radiação direta"

I_b = I - I_d

"Fator geométrico"

R_b= cos(theta)/cos(theta_z)

"Radiação global em superfície inclinada"

I_T = I_b * R_b + I_d * (1+cos(beta))/2

Tabelas decorrentes do cálculo da radiação solar total em superfície inclinada:

a)

| 1..13 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|--------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|------------|--------|--|
| | T_s | ω | I | G_0 | k_T | I_b | I_d | I_T | θ | θ_z | R_b | |
| Run 1 | 6 | -90 | 36,56 | 151,5 | 0,2414 | 2,197 | 34,36 | 31,39 | 97,22 | 83,36 | -1,086 | |
| Run 2 | 7 | -75 | 204 | 448,9 | 0,4546 | 57 | 147 | 161,5 | 84,15 | 69,95 | 0,2971 | |
| Run 3 | 8 | -60 | 449 | 726 | 0,6185 | 260,9 | 188,2 | 340,2 | 70,73 | 56,32 | 0,5951 | |
| Run 4 | 9 | -45 | 482,3 | 964 | 0,5004 | 175,4 | 306,9 | 431,1 | 57,08 | 42,58 | 0,7379 | |
| Run 5 | 10 | -30 | 538 | 1147 | 0,4692 | 164,8 | 373,2 | 503,7 | 43,34 | 28,85 | 0,8304 | |
| Run 6 | 11 | -15 | 694,8 | 1261 | 0,5508 | 317,2 | 377,6 | 657,3 | 29,62 | 15,51 | 0,9021 | |
| Run 7 | 12 | 0 | 799,1 | 1301 | 0,6144 | 458,3 | 340,8 | 777,6 | 16,34 | 6,546 | 0,9659 | |
| Run 8 | 13 | 15 | 924,9 | 1261 | 0,7332 | 732,6 | 192,3 | 943,4 | 7,164 | 15,51 | 1,03 | |
| Run 9 | 14 | 30 | 825,6 | 1147 | 0,72 | 634 | 191,6 | 886,7 | 15,26 | 28,85 | 1,101 | |
| Run 10 | 15 | 45 | 537,7 | 964 | 0,5578 | 252,3 | 285,3 | 581,8 | 28,45 | 42,58 | 1,194 | |
| Run 11 | 16 | 60 | 378,7 | 726 | 0,5217 | 152,6 | 226,2 | 426,3 | 42,16 | 56,32 | 1,337 | |
| Run 12 | 17 | 75 | 187,2 | 448,9 | 0,4171 | 39,39 | 147,8 | 209,7 | 55,91 | 69,95 | 1,635 | |
| Run 13 | 18 | 90 | 50,97 | 151,5 | 0,3365 | 4,27 | 46,7 | 58,79 | 69,56 | 83,36 | 3,018 | |

b)

| 1..13 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|--------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|------------|--------|--|
| | T_s | ω | I | G_0 | k_T | I_b | I_d | I_T | θ | θ_z | R_b | |
| Run 1 | 6 | -90 | 36,56 | 151,5 | 0,2414 | 2,197 | 34,36 | 40,41 | 69,56 | 83,36 | 3,018 | |
| Run 2 | 7 | -75 | 204 | 448,9 | 0,4546 | 57 | 147 | 237,7 | 55,91 | 69,95 | 1,635 | |
| Run 3 | 8 | -60 | 449 | 726 | 0,6185 | 260,9 | 188,2 | 533,6 | 42,16 | 56,32 | 1,337 | |
| Run 4 | 9 | -45 | 482,3 | 964 | 0,5004 | 175,4 | 306,9 | 511,1 | 28,45 | 42,58 | 1,194 | |
| Run 5 | 10 | -30 | 538 | 1147 | 0,4692 | 164,8 | 373,2 | 548,4 | 15,26 | 28,85 | 1,101 | |
| Run 6 | 11 | -15 | 694,8 | 1261 | 0,5508 | 317,2 | 377,6 | 697,8 | 7,164 | 15,51 | 1,03 | |
| Run 7 | 12 | 0 | 799,1 | 1301 | 0,6144 | 458,3 | 340,8 | 777,6 | 16,34 | 6,546 | 0,9659 | |
| Run 8 | 13 | 15 | 924,9 | 1261 | 0,7332 | 732,6 | 192,3 | 849,9 | 29,62 | 15,51 | 0,9021 | |
| Run 9 | 14 | 30 | 825,6 | 1147 | 0,72 | 634 | 191,6 | 714,8 | 43,34 | 28,85 | 0,8304 | |
| Run 10 | 15 | 45 | 537,7 | 964 | 0,5578 | 252,3 | 285,3 | 466,7 | 57,08 | 42,58 | 0,7379 | |
| Run 11 | 16 | 60 | 378,7 | 726 | 0,5217 | 152,6 | 226,2 | 313,1 | 70,73 | 56,32 | 0,5951 | |
| Run 12 | 17 | 75 | 187,2 | 448,9 | 0,4171 | 39,39 | 147,8 | 157 | 84,15 | 69,95 | 0,2971 | |
| Run 13 | 18 | 90 | 50,97 | 151,5 | 0,3365 | 4,27 | 46,7 | 41,26 | 97,22 | 83,36 | -1,086 | |

Tabela I.1: Resultados para o solstício de Junho: a) para $\gamma = 90^\circ$; b) para $\gamma = -90^\circ$.

c)

| 1..11 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
|--------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|------------|--------|--|
| | T_s | ω | I | G_0 | k_T | I_b | I_d | I_T | θ | θ_z | R_b | |
| Run 1 | 7 | -75 | 30,76 | 155,7 | 0,1975 | 1,513 | 29,25 | 27,1 | 96,99 | 83,6 | -1,092 | |
| Run 2 | 8 | -60 | 257,9 | 451,5 | 0,5712 | 127,4 | 130,5 | 170,3 | 83,88 | 71,14 | 0,3296 | |
| Run 3 | 9 | -45 | 357,7 | 705,4 | 0,5071 | 134,5 | 223,2 | 304,6 | 71,35 | 59,67 | 0,6334 | |
| Run 4 | 10 | -30 | 437,9 | 900,3 | 0,4863 | 147,9 | 289,9 | 400,6 | 59,75 | 49,87 | 0,7817 | |
| Run 5 | 11 | -15 | 301 | 1023 | 0,2943 | 22,06 | 279 | 293,7 | 49,78 | 42,93 | 0,882 | |
| Run 6 | 12 | 0 | 315,5 | 1065 | 0,2963 | 23,28 | 292,2 | 309,7 | 42,6 | 40,35 | 0,9659 | |
| Run 7 | 13 | 15 | 685,1 | 1023 | 0,6698 | 462,7 | 222,3 | 704,4 | 39,77 | 42,93 | 1,05 | |
| Run 8 | 14 | 30 | 554,1 | 900,3 | 0,6154 | 318,8 | 235,3 | 597,9 | 42,16 | 49,87 | 1,15 | |
| Run 9 | 15 | 45 | 430 | 705,4 | 0,6095 | 242,7 | 187,2 | 499,2 | 49,03 | 59,67 | 1,298 | |
| Run 10 | 16 | 60 | 273,3 | 451,5 | 0,6053 | 152,1 | 121,1 | 362,8 | 58,82 | 71,14 | 1,602 | |
| Run 11 | 17 | 75 | 83,11 | 155,7 | 0,5337 | 35,32 | 47,79 | 153,8 | 70,3 | 83,6 | 3,023 | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|------------|--------|
| | T_s | ω | I | G_0 | k_T | I_b | I_d | I_T | θ | θ_z | R_b |
| Run 1 | 7 | -75 | 30,76 | 155,7 | 0,1975 | 1,513 | 29,25 | 33,32 | 70,3 | 83,6 | 3,023 |
| Run 2 | 8 | -60 | 257,9 | 451,5 | 0,5712 | 127,4 | 130,5 | 332,4 | 58,82 | 71,14 | 1,602 |
| Run 3 | 9 | -45 | 357,7 | 705,4 | 0,5071 | 134,5 | 223,2 | 394,1 | 49,03 | 59,67 | 1,298 |
| Run 4 | 10 | -30 | 437,9 | 900,3 | 0,4863 | 147,9 | 289,9 | 455,1 | 42,16 | 49,87 | 1,15 |
| Run 5 | 11 | -15 | 301 | 1023 | 0,2943 | 22,06 | 279 | 297,4 | 39,77 | 42,93 | 1,05 |
| Run 6 | 12 | 0 | 315,5 | 1065 | 0,2963 | 23,28 | 292,2 | 309,7 | 42,6 | 40,35 | 0,9659 |
| Run 7 | 13 | 15 | 685,1 | 1023 | 0,6698 | 462,7 | 222,3 | 626,7 | 49,78 | 42,93 | 0,882 |
| Run 8 | 14 | 30 | 554,1 | 900,3 | 0,6154 | 318,8 | 235,3 | 480,5 | 59,75 | 49,87 | 0,7817 |
| Run 9 | 15 | 45 | 430 | 705,4 | 0,6095 | 242,7 | 187,2 | 337,8 | 71,35 | 59,67 | 0,6334 |
| Run 10 | 16 | 60 | 273,3 | 451,5 | 0,6053 | 152,1 | 121,1 | 169,2 | 83,88 | 71,14 | 0,3296 |
| Run 11 | 17 | 75 | 83,11 | 155,7 | 0,5337 | 35,32 | 47,79 | 8,424 | 96,99 | 83,6 | -1,092 |

Tabela I.2: Resultados para o solstício de Dezembro: c) para $\gamma = 90^\circ$; d) para $\gamma = -90^\circ$.

| Solstício de Junho | | | Solstício de Dezembro | | |
|---------------------|--------------------|--------|-----------------------|--------------------|--------|
| $I_T(\gamma = -90)$ | $I_T(\gamma = 90)$ | Média | $I_T(\gamma = -90)$ | $I_T(\gamma = 90)$ | Média |
| 40,41 | 31,39 | 35,9 | 33,32 | 27,1 | 30,21 |
| 237,7 | 161,5 | 199,6 | 332,4 | 170,3 | 251,35 |
| 533,6 | 340,2 | 436,9 | 394,1 | 304,6 | 349,35 |
| 511,1 | 431,1 | 471,1 | 455,1 | 400,6 | 427,85 |
| 548,4 | 503,7 | 526,05 | 297,4 | 293,7 | 295,55 |
| 697,8 | 657,3 | 677,55 | 309,7 | 309,7 | 309,7 |
| 777,6 | 777,6 | 777,6 | 626,7 | 704,4 | 665,55 |
| 849,9 | 943,4 | 896,65 | 480,5 | 597,9 | 539,2 |
| 714,8 | 886,7 | 800,75 | 337,8 | 499,2 | 418,5 |
| 466,7 | 581,8 | 524,25 | 169,2 | 362,8 | 266 |
| 313,1 | 426,3 | 369,7 | 8,424 | 153,8 | 81,112 |
| 157 | 209,7 | 183,35 | — | — | — |
| 41,26 | 58,79 | 50,025 | — | — | — |

Tabela I.3: Radiação total em superfície inclinada para o solstício de Junho e de Dezembro.

Equações do modelo numérico desenvolvido para o balanço energético do destilador proposto:

"Absorvidade da cobertura"

$\alpha_c = 0,07$

"Absorvidade da água"

$\alpha_w = 0,80$

"Área da base"

$A_b = 60 \text{ [m}^2\text{]}$

"Área da cobertura"

$A_c = 80,2 \text{ [m}^2\text{]}$

"Constante de Stefan-Boltzmann"

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$

"Emissividade da cobertura"

$\epsilon_c = 0,9$

"Emissividade da água"

$\epsilon_w = 0,97$

"Coeficiente de perdas de calor para o solo"

$U_s = 0,5 \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$

"Calor Latente de Vaporização"

$h_{fg} = 2346,6 \cdot 10^3 \text{ [J/kg]}$

"Temperatura em Kelvin"

$T_K = 273,15$

"Calor específico da água"

$cp_w = Cp(\text{Water}; T=T_w; P=P_w) \cdot \text{Convert}('kJ/kg^\circ C'; 'W \cdot s/kg^\circ C')$

"Massa da água"

$m_w = 1200$

"Variação do tempo"

$\Delta t = 3600$

"Cálculo iterativo"

{Row=1}

$T_w = \text{Tablevalue}(\text{Row}-1; \#T_w_{\text{mais}})$

"BALANÇO ENERGÉTICO NA COBERTURA"

$Q_{\text{irradiacao_cobertura}} = \alpha_c \cdot I_s \cdot A_c$

$Q_{\text{agua}} = h_{tw} \cdot (T_w - T_c) \cdot A_b$

$Q_{\text{perdas_ambiente}} = h_{1g} \cdot (T_c - T_a) \cdot A_c$

$Q_{\text{irradiacao_cobertura}} + Q_{\text{agua}} = Q_{\text{perdas_ambiente}}$

$h_{1g} = 5,7 + 3,8 \cdot \text{Vento}$

$h_{tw} = h_{rw} + h_{cw} + h_{ew}$

"Cálculo do coeficiente de radiação"

$h_{rw} = \epsilon_{\text{eff}} \cdot \sigma \cdot ((T_w + T_K)^2 + (T_c + T_K)^2) \cdot ((T_w + T_K) + (T_c + T_K))$

$\epsilon_{\text{eff}} = (((1/\epsilon_w) + (1/\epsilon_c) - 1))^{-1}$ "Emissividade efetiva"

"Cálculo do coeficiente de convecção"

$(h_{cw}/0,884)^3 = (T_w - T_c) + ((P_w - P_c) \cdot (T_w + T_K)) / (268900 - P_w)$

$P_w = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T=T_w) \cdot 1000$

$P_c = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T=T_c) \cdot 1000$

"Cálculo do coeficiente de evaporação"

$h_{ew} \cdot (T_w - T_c) = 16,273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{cw} \cdot (P_w - P_c)$

"BALANÇO ENERGÉTICO NA ÁGUA A DESTILAR"

$Q_{\text{acumulacao}} = m_w \cdot cp_w \cdot (T_{w_{\text{mais}}} - T_w) / \Delta t$

$Q_{\text{irradiacao_agua}} = \alpha_w \cdot (1 - \alpha_c) \cdot I_s \cdot A_b$

$Q_{\text{perdas_solo}} = U_s \cdot (T_w - T_a)$

$Q_{\text{irradiacao_agua}} = Q_{\text{acumulacao}} + Q_{\text{agua}} + Q_{\text{perdas_solo}}$

"Produção horária de água destilada"

$m_{\text{dot_ew}} = (A_c \cdot h_{ew} \cdot (T_w - T_c) \cdot \Delta t) / h_{fg}$

$\text{eficiencia} = m_{\text{dot_ew}} \cdot h_{fg} / (I_s \cdot A_b \cdot \Delta t)$

Tabelas decorrentes dos resultados obtidos para todos os parâmetros calculados através do modelo numérico do balanço energético do destilador proposto:

a)

| Table 1 | | | | | | | |
|---------|-----|------------------------------|--------------|----------------|--------------|---------------------|--------------|
| 2.15 | Row | I_s [W/m ²] | T_a [C] | Vento [m/s] | T_w [C] | $T_{w,mais}$ [C] | T_c [C] |
| Run 1 | 1 | | | | | 30 | |
| Run 2 | 2 | 35,9 | 25,3 | 7,22 | 30 | 29,24 | 26,37 |
| Run 3 | 3 | 199,6 | 26,2 | 8,33 | 29,24 | 34,6 | 27,06 |
| Run 4 | 4 | 436,9 | 27 | 9,44 | 34,6 | 45,17 | 29,18 |
| Run 5 | 5 | 471,1 | 27,5 | 10,28 | 45,17 | 48,27 | 32,9 |
| Run 6 | 6 | 526,1 | 27,2 | 11,94 | 48,27 | 48,84 | 33,46 |
| Run 7 | 7 | 677,6 | 27 | 11,39 | 48,84 | 53,81 | 33,91 |
| Run 8 | 8 | 777,6 | 26,8 | 10,97 | 53,81 | 55,35 | 36,52 |
| Run 9 | 9 | 896,7 | 26,6 | 10,56 | 55,35 | 58,67 | 37,61 |
| Run 10 | 10 | 800,8 | 26 | 10 | 58,67 | 53,27 | 39,6 |
| Run 11 | 11 | 524,3 | 25,5 | 9,72 | 53,27 | 46,87 | 35,79 |
| Run 12 | 12 | 369,7 | 25 | 9,31 | 46,87 | 43,3 | 32,14 |
| Run 13 | 13 | 183,4 | 24,6 | 8,89 | 43,3 | 37,13 | 30,21 |
| Run 14 | 14 | 50,03 | 24,2 | 8,33 | 37,13 | 31,71 | 27,55 |

b)

| Table 1 | | | | | | |
|---------|----------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| 2.15 | $Q_{irradiacao;cobertura}$ | $Q_{perdas;ambiente}$ | Q_{agua} | $Q_{irradiacao;agua}$ | $Q_{acumulacao}$ | $Q_{perdas;solo}$ |
| Run 1 | | | | | | |
| Run 2 | 201,5 | 2857 | 2655 | 1603 | -1055 | 2,35 |
| Run 3 | 1121 | 2578 | 1457 | 8910 | 7451 | 1,521 |
| Run 4 | 2453 | 7255 | 4803 | 19503 | 14697 | 3,799 |
| Run 5 | 2645 | 19374 | 16730 | 21030 | 4291 | 8,837 |
| Run 6 | 2953 | 25640 | 22687 | 23483 | 785,4 | 10,53 |
| Run 7 | 3804 | 27151 | 23347 | 30246 | 6888 | 10,92 |
| Run 8 | 4365 | 36926 | 32561 | 34712 | 2138 | 13,5 |
| Run 9 | 5034 | 40463 | 35430 | 40026 | 4582 | 14,38 |
| Run 10 | 4495 | 47676 | 43181 | 35745 | -7452 | 16,33 |
| Run 11 | 2943 | 35186 | 32243 | 23403 | -8854 | 13,89 |
| Run 12 | 2075 | 23522 | 21446 | 16503 | -4954 | 10,94 |
| Run 13 | 1029 | 17759 | 16729 | 8185 | -8554 | 9,349 |
| Run 14 | 280,8 | 10040 | 9759 | 2233 | -7533 | 6,466 |

c)

| 2..15 | 7 m_{ew} | 8 eficiencia | 9 h_{cw} [W/m ²] | 10 h_{ew} [W/m ²] | 11 h_{rw} [W/m ²] |
|--------|------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Run 1 | | | | | |
| Run 2 | 2,368 | 0,7165 | 1,465 | 5,308 | 5,434 |
| Run 3 | 1,199 | 0,06526 | 1,236 | 4,468 | 5,432 |
| Run 4 | 4,952 | 0,1231 | 1,701 | 7,422 | 5,637 |
| Run 5 | 21,67 | 0,4998 | 2,317 | 14,35 | 6,045 |
| Run 6 | 30,77 | 0,6354 | 2,495 | 16,88 | 6,153 |
| Run 7 | 31,92 | 0,5117 | 2,509 | 17,38 | 6,183 |
| Run 8 | 47,38 | 0,662 | 2,702 | 22,27 | 6,41 |
| Run 9 | 52,48 | 0,6358 | 2,751 | 24,04 | 6,49 |
| Run 10 | 66,2 | 0,8982 | 2,873 | 28,22 | 6,654 |
| Run 11 | 46,6 | 0,9657 | 2,701 | 21,67 | 6,372 |
| Run 12 | 28,49 | 0,8372 | 2,472 | 15,72 | 6,073 |
| Run 13 | 21,01 | 1,245 | 2,34 | 13,05 | 5,913 |
| Run 14 | 10,91 | 2,368 | 2,063 | 9,251 | 5,663 |

Tabela I.4 a), b) e c): Resultados para o solstício de Junho.

d)

| 2..13 | 1 Row | 2 I_s [W/m ²] | 3 T_a [C] | 4 Vento [m/s] | 5 T_w [C] | 6 $T_{w,mais}$ [C] | 7 T_c [C] |
|--------|-------|--------------------------------|----------------|------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| Run 1 | 1 | | | | | 30 | |
| Run 2 | 2 | 30,21 | 23,4 | 6,11 | 30 | 28,28 | 25,09 |
| Run 3 | 3 | 251,4 | 24 | 7,22 | 28,28 | 34,88 | 25,29 |
| Run 4 | 4 | 349,4 | 25,6 | 8,19 | 34,88 | 41,77 | 28,3 |
| Run 5 | 5 | 427,9 | 25,6 | 8,19 | 41,77 | 46,08 | 30,86 |
| Run 6 | 6 | 295,6 | 24,9 | 7,78 | 46,08 | 41,59 | 32,35 |
| Run 7 | 7 | 309,7 | 24,9 | 7,78 | 41,59 | 41,81 | 30,29 |
| Run 8 | 8 | 665,6 | 24,9 | 7,64 | 41,81 | 53,79 | 30,94 |
| Run 9 | 9 | 539,2 | 24,5 | 7,22 | 53,79 | 48,75 | 37,31 |
| Run 10 | 10 | 418,5 | 24,5 | 6,67 | 48,75 | 46,1 | 34,41 |
| Run 11 | 11 | 266 | 24 | 6,39 | 46,1 | 40,87 | 32,57 |
| Run 12 | 12 | 81,11 | 23,6 | 5,97 | 40,87 | 33,98 | 29,58 |

e)

| 2..13 | 7 $Q_{irradiacao;cobertura}$ | 8 $Q_{perdas;ambiente}$ | 9 Q_{agua} | 10 $Q_{irradiacao;agua}$ | 11 $Q_{acumulacao}$ | 12 $Q_{perdas;solo}$ |
|--------|------------------------------|-------------------------|--------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| Run 1 | | | | | | |
| Run 2 | 169,6 | 3912 | 3743 | 1349 | -2397 | 3,3 |
| Run 3 | 1411 | 3438 | 2027 | 11220 | 9191 | 2,138 |
| Run 4 | 1961 | 7979 | 6018 | 15595 | 9573 | 4,642 |
| Run 5 | 2402 | 15520 | 13118 | 19099 | 5974 | 8,086 |
| Run 6 | 1659 | 21058 | 19398 | 13193 | -6216 | 10,59 |
| Run 7 | 1739 | 15258 | 13519 | 13825 | 297,6 | 8,346 |
| Run 8 | 3736 | 16812 | 13076 | 29710 | 16626 | 8,454 |
| Run 9 | 3027 | 34055 | 31027 | 24070 | -6972 | 14,64 |
| Run 10 | 2349 | 24687 | 22338 | 18682 | -3668 | 12,12 |
| Run 11 | 1493 | 20613 | 19119 | 11874 | -7256 | 11,05 |
| Run 12 | 455,4 | 13621 | 13165 | 3621 | -9553 | 8,633 |

f)

| 2..13 | 7 m_{ew} | 8 eficiencia | 9 h_{cw} [W/m ²] | 10 h_{ew} [W/m ²] | 11 h_{rw} [W/m ²] |
|--------|------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Run 1 | | | | | |
| Run 2 | 3,433 | 1,235 | 1,618 | 5,679 | 5,4 |
| Run 3 | 1,69 | 0,07304 | 1,365 | 4,605 | 5,359 |
| Run 4 | 6,32 | 0,1965 | 1,812 | 7,805 | 5,621 |
| Run 5 | 16,04 | 0,4073 | 2,196 | 11,94 | 5,887 |
| Run 6 | 25,48 | 0,9365 | 2,409 | 15,08 | 6,055 |
| Run 7 | 16,49 | 0,5783 | 2,217 | 11,86 | 5,866 |
| Run 8 | 16 | 0,2612 | 2,193 | 11,96 | 5,891 |
| Run 9 | 45,19 | 0,9105 | 2,664 | 22,3 | 6,433 |
| Run 10 | 30,51 | 0,7921 | 2,478 | 17,3 | 6,194 |
| Run 11 | 25,12 | 1,026 | 2,399 | 15,1 | 6,063 |
| Run 12 | 15,85 | 2,122 | 2,208 | 11,42 | 5,826 |

Tabela I.5 d), e) e f): Resultados para o solstício de Dezembro.